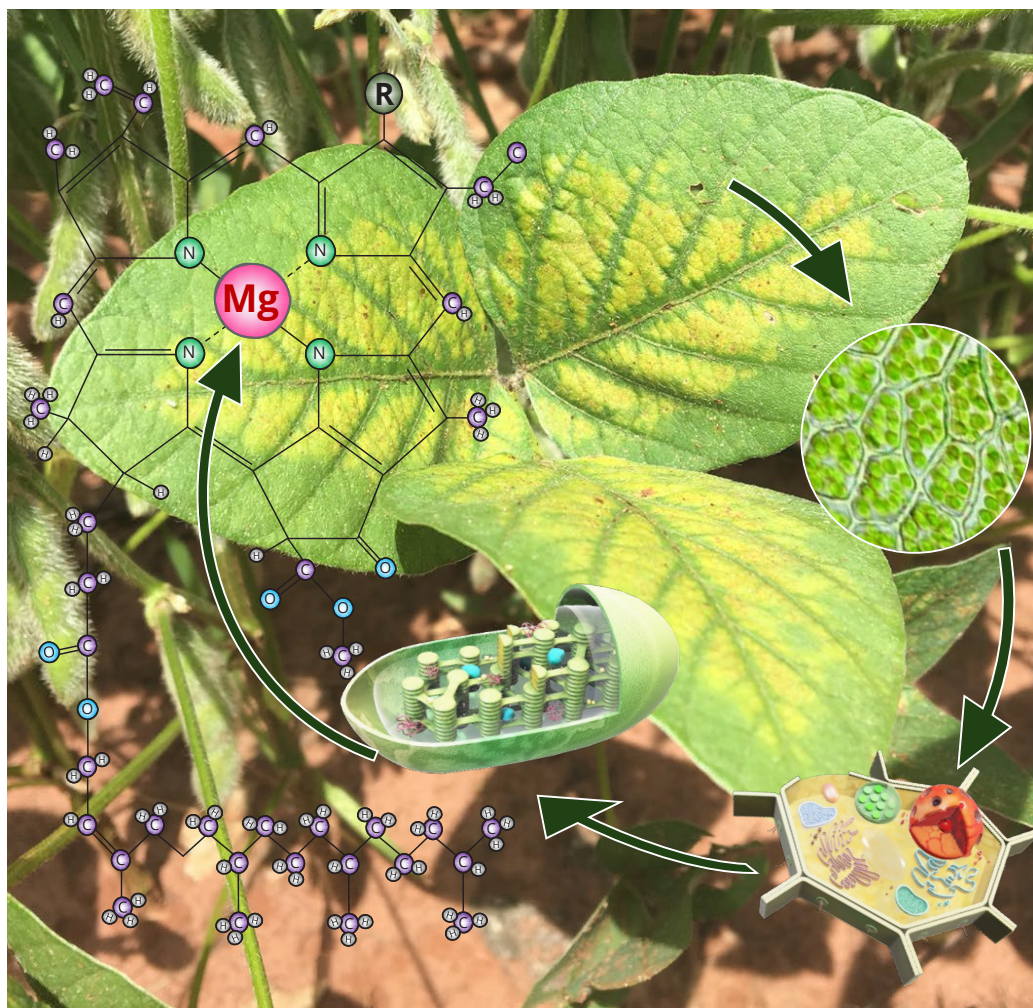


Magnésio

Manejo para o equilíbrio nutricional da soja



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

DOCUMENTOS 430

Magnésio:

Manejo para o equilíbrio nutricional da soja

*César de Castro
Adilson de Oliveira Junior
Fábio Álvares de Oliveira
Ruan Francisco Firmano
Leandro Zancanaro
Dirceu Klepker
José Salvador Simonetto Foloni
Alexandre Magno Brighenti
Vinícius de Melo Benites*

***Embrapa Soja
Londrina, PR
2020***

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Soja
Rod. Carlos João Strass, s/n
Acesso Orlando Amaral, Distrito da Warta
CEP 86001-970
Caixa Postal 231
Londrina, PR
Fone: (43) 3371 6000
www.embrapa.br/soja
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

**Comitê Local de Publicações
da Embrapa Soja**

Presidente
Ricardo Vilela Abdelnoor

Secretária-Executiva
Regina Maria Villas-Bôas de Campos Leite

Membros
Clara Beatriz Hoffmann-Campo, Claudine Dinali Santos Seixas, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, Liliane Márcia Mertz-Henning, Mariangela Hungria da Cunha, Mônica Juliani Zavaglia Pereira, Norman Neumaier e Vera de Toledo Benassi.

Supervisão editorial
Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol

Normalização bibliográfica
Valéria de Fátima Cardoso

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol

Foto da capa
Cesar de Castro

Ilustração da capa
Ruan Francisco Firmano

1ª edição
PDF digitalizado (2020).

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Soja

Magnésio: manejo para o equilíbrio nutricional da soja / César de Castro... [et al.]. –
Londrina : Embrapa Soja, 2020.
54 p. - (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937 ; n. 430).

1. Soja. 2. Magnésio. 3. Eficiência nutricional. I. Castro, César de. II. Oliveira Junior, Adilson de. III. Oliveira, Fábio Álvares de. IV. Firmano, Ruan Francisco. V. Zancanaro, Leandro. VI. Klepker, Dirceu. VII. Foloni, José Salvador Simonetto. VIII. Brighenti, Alexandre Magno. IX. Benites, Vinícius de Melo. X. Série.

CDD: 631.8 (21. ed.)

Autores

César de Castro

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Adilson de Oliveira Junior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Fábio Alvares de Oliveira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Ruan Francisco Firmano

Engenheiro-agrônomo, mestre em Solos e Nutrição de Plantas, doutorando do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

Leandro Zancanaro

Engenheiro-agrônomo, mestre em Ciências do Solo, pesquisador da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, Rondonópolis, MT.

Dirceu Klepker

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Cocais, UEP Balsas, Balsas, MA.

José Salvador Simonetto Foloni

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agricultura, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Alexandre Magno Brighenti

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG.

Vinícius de Melo Benites

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ.

Apresentação

Esta publicação é o resultado do esforço conjunto de anos de pesquisa da Embrapa (Soja, Cocais, Gado de Leite e Solos) e da Fundação MT, que, ao longo do tempo, por meio de experimentos e observações de campo, acumularam um conjunto de informações técnicas sobre um nutriente pouco discutido no manejo nutricional dos agroecossistemas de produção.

Em 2020, ano em que uma das poucas certezas é a sustentabilidade do agronegócio brasileiro, em que a generosidade e a inteligência precisam ser o prolongamento da razão, entregamos esta robusta publicação que, já no título “**Magnésio: manejo para o equilíbrio nutricional da soja**”, sinaliza a importância das relações entre os nutrientes, bem como no seu conteúdo, enfatiza uma verdade incontestável, a **Lei do Mínimo**, de Justus von Liebig, para a obtenção de elevadas produtividades.

O objetivo deste trabalho foi promover uma ampla discussão sobre a importância do magnésio no manejo nutricional das culturas, bem como na nutrição humana e de animais, por meio da biofortificação de grãos, em função da maior oferta desse nutriente, esquecido na cadeia alimentar.

A Embrapa Soja, na busca pelo melhor entendimento de todos os aspectos da produção agropecuária, vem, mais uma vez, cumprir sua missão em oferecer informações precisas, úteis e de fácil utilização, na busca de soluções viáveis para o aprimoramento do manejo sustentável da soja.

Ricardo Vilela Abdelnoor

Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Soja

Sumário

Introdução	9
Magnésio no solo	11
Relações Ca, Mg e K e a ocupação da CTC do solo	16
Magnésio nas plantas.....	20
Sintomas de deficiência de magnésio nas plantas	23
Importância da análise de solo e de tecido vegetal	32
Magnésio nos sistemas de produção	35
Absorção e acúmulo de magnésio na soja	41
Estratégias de correção do magnésio no solo	44
Considerações finais	46
Referências	49

Introdução

Apesar de todos os avanços tecnológicos na agricultura, com formulações de fertilizantes contendo diversas inovações tecnológicas, como por exemplo mecanismos de liberação controlada, nanotecnologias, entre outras, sintomas de deficiência ou toxicidade nutricional têm sido comuns em várias culturas, bem como outros sintomas pouco perceptíveis, além de fome oculta e desequilíbrios nutricionais, muitos deles relacionados ao magnésio (Mg).

Ainda que as novas tecnologias promovam o aumento da eficiência dos fertilizantes, a carência de um diagnóstico correto acentua desbalanços nutricionais associados à redução do potencial produtivo das culturas. Isso se deve tanto ao uso ineficiente das análises de solo, da quase total negligência na adoção e adequada interpretação da análise de tecidos vegetais e, ainda, à aplicação incorreta de conceitos de manejo da fertilidade do solo. No caso do Mg, observa-se a pouca atenção dada ao nutriente, não só na produção agrícola, mas também na produção de pastagens para alimentação animal e até na saúde humana (Cakmak, 2013; 2015).

Antes de se fazer um diagnóstico do estado nutricional das plantas, é imprescindível ter informações para distinguir os sintomas nutricionais de outras possíveis causas, associadas a estresses bióticos, como incidência de pragas ou doenças, ou estresses abióticos, como ocorrência de eventos climáticos extremos e fitotoxidez por erros de aplicação. Deve-se levantar todas as informações relevantes para tornar o diagnóstico preciso, como histórico de adubação e uso de bioestimulantes, distribuição das plantas com sintomas na lavoura, gradiente de desenvolvimento dos sintomas nas partes das plantas e simetria dos sintomas nas folhas com mesma idade fisiológica.

Como a folha é normalmente o órgão de maior atividade metabólica e que expressa de maneira mais intensa e rápida os sintomas de deficiência ou toxidez nutricional, de modo geral, é o órgão indicado para avaliar o estado nutricional das plantas.

A mobilidade dos nutrientes é um detalhe importante que deve ser observado quando se busca identificar um possível sintoma de desordem nutricional nas plantas. A maior ou menor mobilidade dos nutrientes no floema tem profunda

importância prática na identificação visual dos sintomas característicos de alguma anormalidade (deficiência ou toxicidade). A localização dos sintomas nas folhas ocorrerá em função da redistribuição dos nutrientes para os pontos de crescimento ou de acúmulo, dependentes de diversos fatores como o estágio de desenvolvimento das plantas, entre outros. Assim, a localização/idade das folhas com sintomas (folhas de baixo/velhas ou de cima/novas) possibilita classificar os nutrientes pelos grupos de mobilidade e, dessa maneira, aumentar as chances de predição do nutriente causador de um sintoma específico.

Seguindo a mesma lógica de tentativa de identificação de sintomas, deve-se observar que os sintomas do nutriente com grande mobilidade (redistribuição) aparecem, primeiramente, nas folhas mais velhas. Por outro lado, para os nutrientes com menor redistribuição, os sintomas de deficiências aparecem nas folhas novas. Em todos os casos, é possível identificar um gradiente de intensidade dos sintomas típicos. Vale lembrar, que essa classificação tem uma função muito mais didática que fisiológica, uma vez que a variação temporal da disponibilidade de nutrientes no solo e o estágio de desenvolvimento das plantas podem afetar a absorção e a distribuição característica do nutriente.

Não obstante a possibilidade de identificação visual de sintomas nutricionais, a identificação correta e a quantificação do grau de deficiência ou toxicidade, bem como a recomendação de adubação e o monitoramento do estado nutricional da cultura da soja (*Glycine max* L.) requerem duas ferramentas indispensáveis: a análise do solo e a análise de folhas, somadas a uma interpretação criteriosa dos resultados.

O objetivo desse documento foi reunir um conjunto de informações de trabalhos de fertilidade do solo desenvolvidos pela Embrapa e parceiros, além de observações de campo, afim de promover uma ampla discussão sobre a importância do Mg no manejo nutricional da soja, em função da vasta distribuição de sintomas de desequilíbrios nutricionais observados em lavouras no Brasil.

Magnésio no solo

O Mg compõe cerca de 2% da crosta terrestre e no solo tem sua origem em minerais primários silicatados como hornblenda, augita, olivina, talco, serpentina, clorita, biotita. No entanto, a principal fonte de Mg para o manejo da fertilidade do solo é a dolomita - $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ (Slater, 1952; Tisdale et al., 1985; Sousa et al., 2007; Raji, 2011).

Os solos brasileiros são de modo geral pobres em Mg. Isso se deve tanto ao material de origem com baixas concentrações no nutriente quanto a intensos processos pedogenéticos ao longo da formação dos solos nos quais os produtos de intemperização como o Mg são lixiviados. O processo de acidificação do solo também influencia negativamente o Mg devido a reduzida estabilidade de carbonatos, sulfatos, silicatos e aluminossilicatos de Mg em meios ácidos.

No solo, o Mg total pode ser dividido nas frações: (1) não trocável, presente na estrutura dos minerais; (2) trocável, que está adsorvido de forma eletrostática aos coloides minerais e orgânicos do solo e, (3) como íon livre na solução do solo cujas concentrações variam de 5 a 50 mg/L (Tisdale; Nelson, 1993). As três frações se mantêm em equilíbrio termodinâmico. A fração, ou fase não trocável, a qual contém a maior proporção do Mg total, é composta pelo Mg dos minerais primários e por parte do Mg de minerais de argila secundários (Mengel; Kirkby, 1978; Melo et al., 2000).

Na Figura 1 é apresentado o ciclo biogeoquímico do Mg em um sistema agrícola, destacando-se a origem mineral pelo intemperismo das rochas e as “entradas” do nutriente via resíduos culturais e aplicação de fertilizantes e principalmente, corretivos, bem como as “saídas” representadas pela exportação do nutriente pelas colheitas, além das perdas por lixiviação e erosão.

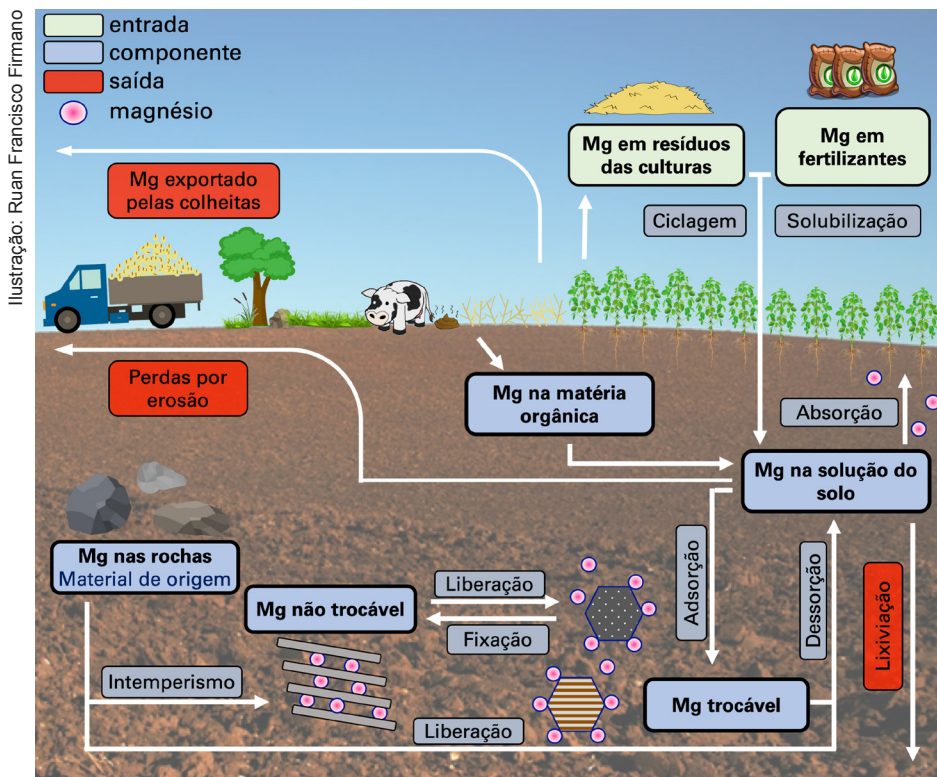


Figura 1. Representação esquemática do ciclo biogeoquímico do magnésio em um sistema de produção agrícola.

O Mg, assim como outros nutrientes, pode ser removido do solo por lixiviação, exportação via colheitas e erosão. As perdas por erosão dependem da textura e topografia do solo, do volume de chuvas, do sistema de cultivo e do teor dos nutrientes no solo.

Em função da dinâmica de liberação, a fração não trocável de Mg não é considerada uma fonte importante de fornecimento do nutriente para plantas de cultivo anual. Contudo, dependendo do material de origem do solo e das condições de intemperismo, essa fração pode contribuir significativamente para a manutenção da disponibilidade de Mg no solo (Mengel; Kirkby, 1978). Comportamento semelhante tem sido observado para o potássio (K) em solos com teores solúveis muito baixos, com fornecimento de K às plantas em quantidades suficientes (Oliveira Junior et al., 2013; Firmano et al., 2020).

Nestes trabalhos, foi observado que a contribuição da fração não trocável de K ocorre em condições de muito baixa disponibilidade de K ($\sim 0,1 \text{ cmol}_e/\text{dm}^3$). Mesmo nessas condições produtividades de soja acima de 3000 kg/ha podem ocorrer. Isto é possível pela “reserva” de K não trocável, que não é acessada pelo extrator Mehlich-1 na avaliação do teor disponível. Contudo, a medida que a reserva não trocável de K ou de Mg é exaurida pelos processos naturais de perda ou exportação pelas colheitas, torna-se impossível alcançar altas produtividade de soja, mesmo sem a ocorrência dos sintomas aparentes da deficiência dos nutrientes (fome oculta).

O Mg disponível do solo apresenta-se na forma catiônica (Mg^{2+}) distribuída no complexo de troca de cátions e na solução do solo (Figura 1). Os principais fatores que afetam a sua disponibilidade às plantas são as quantidades totais de Mg trocável e a sua concentração relativa ao grau de saturação do complexo de troca e, também, em relação aos demais cátions predominantes nesse complexo.

A taxa de absorção pode ser fortemente reduzida por outros nutrientes no solo; bem como, pelo desequilíbrio em relação ao cálcio (Ca^{2+}), manganês ($\text{Mn}^{2+}, 4+$) (Mengel; Kirkby, 1978; Heenan; Campbell, 1981; Bergmann, 1992), amônio (NH_4^+) e K^+ (Kurvits; Kirkby, 1980). Altas atividades de H^+ em solos com baixo pH (H_2O) ($\sim 4,5$ ou menos) também reduzem a disponibilidade de Mg (Marschner, 2012). A deficiência de Mg induzida por cátions competidores é, portanto, um fenômeno que pode ser bastante comum em condições de manejo inadequado da calagem e da adubação.

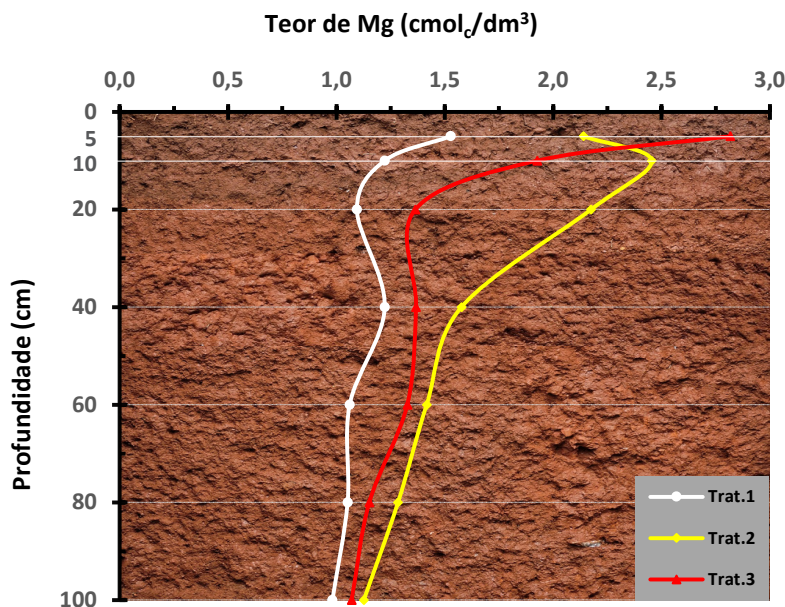
No caso específico da relação K/Mg, o desequilíbrio reduz a disponibilidade de Mg, pela intensificação da inibição competitiva. Por esse motivo, é recomendado avaliar o teor de Mg no solo e o seu equilíbrio em relação aos demais nutrientes. Com isso, observa-se que a deficiência de Mg por competição com outros cátions do solo pode ser comum, em função de desbalanços causados por outros íons provenientes da calagem e da adubação.

Originalmente, a deficiência de Mg ocorre em solos ácidos e de textura arenosa, cujo material de origem é pobre em Mg, consequentemente, esses solos possuem baixos teores naturais de Mg (Arnold, 1967; Havlin, et al., 2005) e, principalmente, com altos teores de K. No Brasil, os principais processos

que têm conduzido à deficiência de Mg no solo são o manejo inadequado da calagem, da gessagem (Caires, 2011) e da adubação.

As perdas por lixiviação são dependentes da textura e da mineralogia do solo, que é diretamente relacionada à CTC do solo e que, em solos tropicais, é predominantemente dependente do pH (Catani; Gallo, 1955; Raij, 1991). Dessa forma, esse fenômeno pode ser fortemente associado à quantidade, tipo e forma de aplicação do corretivo de solo

Entretanto, estudos de longa duração conduzidos em Londrina, PR, em solo de textura muito argilosa (~800 g/kg de argila), desde 2010 até os dias atuais, com rotação soja/trigo, trigo/girassol, soja/girassol e soja/milho, e combinações de doses e métodos de aplicação de calcário dolomítico e gesso, mostraram movimentação distintas do Mg, até 100 cm de profundidade do solo (Figura 2).



Trat. 1: controle; **Trat. 2:** 8,0 t de calcário e de gesso sendo: 2,0 t/ha de calcário e 2,0 t/ha de gesso em 2010 e 6,0 t/ha de calcário e 6,0 t/ha de gesso em 2013 (Incorporado); **Trat. 3:** 8,0 t de calcário e de gesso sendo: 2,0 t/ha de calcário e 2,0 t/ha de gesso em 2010 e 6,0 t/ha de calcário e 6,0 t/ha de gesso em 2013 (Superficial).

Figura 2. Efeito da aplicação de calcário dolomítico e gesso, na movimentação de magnésio no solo em profundidade (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm), na safra 2015/2016.

Na Figura 2, a diferença básica entre os tratamentos 2 e 3 está na forma da aplicação dos corretivos. Enquanto no tratamento 2, a aplicação foi incorporada, no tratamento 3, a aplicação foi superficial.

Conforme se observa na Figura 2, o acúmulo de Mg nos primeiros 5 cm variou de 1,53 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ no tratamento 1 (controle), 2,1 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ no tratamento 2 e 2,82 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ no tratamento 3. No tratamento 2, com aplicação incorporada de calcário e gesso, o maior acúmulo de Mg ocorreu na profundidade de 5 a 10 cm, com declínio mais acentuado até 40 cm. No tratamento 3, onde os corretivos foram aplicados a lanço em superfície, a maior concentração de Mg ocorreu nos primeiros 5 cm do solo, reduzindo significativamente até a camada de 10 a 20 cm de profundidade, mantendo-se, em relação ao tratamento incorporado, com menor concentração do nutriente até 100 cm de profundidade.

A absorção dos nutrientes pelas raízes das plantas ocorre a partir da solução do solo, mantida em equilíbrio pela liberação dos nutrientes retidos na fase sólida. No entanto, a adição de nutrientes aos sistemas de produção e/ou sua ciclagem resultante da incorporação de diferentes culturas também influenciam o equilíbrio químico do Mg no solo, o que reforça a importância de sistemas de produção mais diversificados.

O mecanismo de contato e a posterior absorção dos nutrientes pelas raízes das plantas podem ocorrer por três processos: interceptação radicular, fluxo em massa e difusão. No caso do Mg, o fluxo em massa tem fundamental importância (Malavolta et al., 1997; Fageria et al., 2011) e é altamente dependente da disponibilidade de água no solo e da transpiração das plantas.

Outro processo que também contribui significativamente para a absorção do Mg é a interceptação radicular, o que indica que a aplicação do nutriente deve ser, preferencialmente, feita a lanço e incorporada. No entanto, a aplicação dos corretivos de acidez, principal fonte de Mg, é geralmente feita a lanço, na superfície do solo. Assim, devido ao posicionamento do Mg^{2+} é necessário mais tempo de reação para a solubilização do calcário e eventual contato do íon com as raízes.

A distribuição dos nutrientes no perfil do solo, na frente de desenvolvimento das raízes, tem sido cada vez mais importante, não só para a nutrição e

fornecimento de água às plantas, mas também, para reduzir os efeitos do alumínio (Al) tóxico, que pode ser mitigado pelo Mg (Cakmak, 2013). Esse efeito benéfico ocorre na presença de Ca, que desempenha papel fundamental na proteção do crescimento das raízes contra os efeitos do baixo pH (Kinraide, 1998; Marschner, 2012). Contudo, Silva et al. (2005), trabalhando com raízes de soja na presença ou ausência do Al em condições controladas (fitotron), destacaram, sobretudo, a importância do Mg na elongação radicular. Segundo estes autores, o Mg em baixas concentrações é mais eficiente que o Ca para reduzir a rizotoxicidade do Al, e que os mecanismos fisiológicos envolvidos no efeito protetor do Mg contra a toxicidade do Al às raízes ainda não são conhecidos.

Considerando somente os nutrientes no solo, os cátions trocáveis não são retidos com a mesma força pelos coloides, existindo uma ordem preferencial de retenção: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ (série liotrópica de Hoffmeister). De modo geral, essa série preferencial leva em consideração a energia de ligação e o raio iônico hidratado do cátion. A variação nas concentrações dos cátions na solução do solo, por força da lei de ação das massas e da atividade iônica, pode saturar o complexo de troca com outro cátion, deslocando os demais cátions trocáveis para a solução (Russell, 1942; Russell; Russell, 1973; Mengel; Kirkby, 1978).

Assim, manejo de solos que privilegiam aplicações constantes e elevadas de calcário calcítico, gesso ou de adubação potássica, em desequilíbrio com o Mg no solo, podem conduzir à deficiência desse nutriente no solo.

Relações Ca, Mg e K e a ocupação da CTC do solo

O teor de Mg trocável é utilizado como principal indicador da disponibilidade do nutriente no solo. Porém, essa informação isoladamente pode não garantir o diagnóstico correto quanto à suficiência do nutriente para as plantas, pois é necessário considerar a estreita relação desse nutriente com os demais cátions no solo, sua mobilidade e retenção pelos coloides e, também, os processos inerentes à absorção do cátion pelas plantas.

A disponibilidade de Mg^{2+} no complexo de troca e a sua absorção pelas plantas é dependente da disponibilidade de Ca^{2+} , cátion dominante no complexo de troca do solo e também de K^+ , cátion preferencialmente absorvido pelas plantas e segundo nutriente mais exportado em grãos de soja. Assim, além do teor disponível do nutriente no solo, medido em $cmol_c/dm^3$, de forma secundária, a porcentagem do nutriente na CTC e a relação do íon Mg^{2+} com os demais cátions do complexo de troca, principalmente o Ca^{2+} e o K^+ , tem uma importância complementar na avaliação do equilíbrio entre cátions trocáveis de caráter básico, tendo em vista que estes três nutrientes compõem a maioria dos cátions trocáveis no complexo eletronegativo de troca do solo.

É fundamental, antes de se pensar nas relações entre nutrientes, primeiro elevar a concentração dos mesmos até teores considerados adequados, em função da CTC do solo e, depois, buscar o equilíbrio desejado.

Bear e Prince (1945) e Bear e Toth (1948), trabalhando com alfafa em solos muito diferentes das nossas condições, no estado de New Jersey, Estado Unidos, estabeleceram o conceito de solo ideal, considerando a relação entre cátions trocáveis do solo. A existência de uma relação ideal de saturação da CTC por cátions básicos também é o alicerce da teoria de Albrecht (Albrecht, 1996). Essas teorias que atribuem ao equilíbrio de bases disponíveis no solo a razão principal para garantir uma nutrição de plantas adequada são bastante controversas e menos aceitas que a interpretação baseada em níveis de suficiência (Schulte; Kelling, 2004).

Quaggio (2000), após longa revisão dos trabalhos com relação Ca/Mg, desenvolvidos no Brasil, conclui que a mesma não tem importância para o crescimento ou produção das plantas, e que os efeitos das relações extremas dos dois nutrientes nas plantas não se deve à ação direta da relação Ca/Mg, mas sim, de deficiência de Ca ou de Mg. Para Barber (1984) pode haver uma ampla faixa de relação entre Ca e Mg no solo sem comprometer a produtividade, desde que a quantidade de Mg no solo seja suficiente.

Frequentemente, essas relações ou balanço de cátions trocáveis no solo não apresentam correlações significativas com a melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, sendo mais importante os teores adequados dos nutrientes no solo (Kopittke; Menzies, 2007). Além disso, as re-

lações entre nutrientes não são condicionantes para a obtenção de elevadas produtividades de soja, pois nem sempre as maiores produtividades têm, invariavelmente, uma estreita relação com esses balanços. Apesar disso, a relação entre os nutrientes Ca e Mg pode ser útil para a escolha da fonte de calcário (calcítico ou dolomítico) a ser utilizada no manejo da acidez do solo e de modo geral como uma referência complementar para a interpretação da análise química do solo (Oliveira Junior et al., 2020).

Ainda assim, mesmo se considerando que a relação entre os nutrientes Ca, Mg e K que constam nos laudos das análises de solo não representam o que realmente ocorre na rizosfera, é comum nos meios agrônômicos atribuir-se uma faixa de valores para as relações entre os três nutrientes.

Um aspecto importante e que, algumas vezes, não é adequadamente considerado, é que a produtividade das culturas é dependente das condições ambientais, como clima e altitude (Gonçalves et al., 2020), distribuição de água durante as principais fases de desenvolvimento das plantas, propriedades do solo, como a CTC, disponibilidade de nutrientes, estrutura, perfil e compactação do solo, entre outras variáveis.

Assim, um conceito importante que se deve ter em mente é que, numa visão mais ampla, a fertilidade do solo não está restrita somente às propriedades químicas do solo e as concentrações de nutrientes, mas a interação e o condicionamento desempenhados pelas propriedades físicas do solo, e pela atividade biológica do solo.

Outra questão importante que deve ser observada é a forma como está sendo praticado o manejo da fertilidade do solo em algumas áreas. Atualmente, a aplicação de corretivos de acidez e condicionadores de solo, como o calcário e o gesso agrícola tem sido realizada superficialmente para a manutenção do sistema de semeadura direta.

Além da calagem e/ou gessagem, com o principal objetivo de aumentar o rendimento operacional da semeadura, também as adubações com fósforo (P) e K, em muitas lavouras, têm sido realizadas à lanço na superfície do solo.

Como consequência da continuidade dessas práticas, em função da solubilidade destes minerais e da mobilidade característica de cada nutriente/fonte (Ca, Mg, S, P e K), associadas à distribuição de chuvas, relevo, cobertura vegetal, teor de matéria orgânica, estrutura dos agregados, porosidade do solo e nível de compactação, verifica-se um gradiente nos teores de nutrientes e de acidez do solo. Caso especial acontece com o fósforo, com elevada concentração, nos primeiros centímetros do solo, e acentuada redução de sua disponibilidade em camadas mais profundas no perfil do solo (Bataglia et al., 2009), além do zinco (Zn).

A grande concentração de nutrientes nos primeiros centímetros de solo também ocorre, em menor proporção, com outros nutrientes. Assim, uma mesma planta, desde a germinação da semente, encontrará em cada profundidade ao longo do perfil de crescimento das raízes, teores e relações entre nutrientes distintas. Na Tabela 1, é apresentado um exemplo do gradiente de distribuição e relações de nutrientes no solo em condições de campo, em área de produtor.

Tabela 1. Teores de nutrientes e relações entre cálcio, magnésio e potássio no solo - Paraná, na safra 2016/2017.

Prof. (cm)	P	Ca	Mg	K	Relações			
					Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K
	mg/dm³	cmol _c /dm³						
0 - 10	17,62	6,75	3,58	0,06	1,9	112	60	172
10 -20	1,15	5,10	2,18	0,04	2,3	128	55	182
20 - 40	0,75	2,65	1,31	0,03	2,0	88	44	132



Magnésio nas plantas

As plantas absorvem o magnésio como íon Mg^{2+} e nessa forma o nutriente é transportado, via xilema, para diversas partes das plantas em desenvolvimento e incorporado pelas células onde desempenha importantes funções no metabolismo vegetal, como a atividade fotossintética e a incorporação do carbono (C) (Marschner, 2012). O Mg também desempenha um papel fundamental nos mecanismos de defesa das plantas em condições de estresse abiótico (Senbayram et al., 2015), sendo altamente influenciado pela intensidade luminosa. Assim, plantas cultivadas em condições de elevada intensidade luminosa parecem ter maior necessidade por Mg do que plantas cultivadas em ambientes com menor intensidade luminosa (Cakmak; Yazici, 2010).

Diferentemente do Ca, o Mg é rapidamente redistribuído via floema das regiões maduras para as mais novas da planta, com crescimento ativo (Malavolta, 1976; Epstein; Bloom, 2005). Ou seja, das folhas mais velhas na parte inferior das plantas, para as folhas mais novas na parte superior das plantas e também para os órgãos reprodutivos.

Parte do Mg absorvido pelas plantas é constituinte estrutural da clorofila (Figura 3), molécula orgânica fundamental no processo físico-químico da fotossíntese, e da vida. O Mg é o átomo central da molécula de clorofila, correspondendo ao redor de 2,7% do peso molecular da clorofila e, dependendo do estado nutricional, entre 6 e 25% do Mg total das plantas está ligado à clorofila (Marschner, 2012). Em geral, outros 5 a 10% do Mg total estão presentes nas folhas, firmemente associado à pectina nas paredes celulares ou precipitado como sais pouco solúveis no vacúolo, participando da regulação osmótica. No entanto, entre 60 a 90% do Mg acumulado nas plantas é extraível com água (Marschner, 2012) e, portanto, permanece solúvel e confere o caráter móvel ao nutriente.

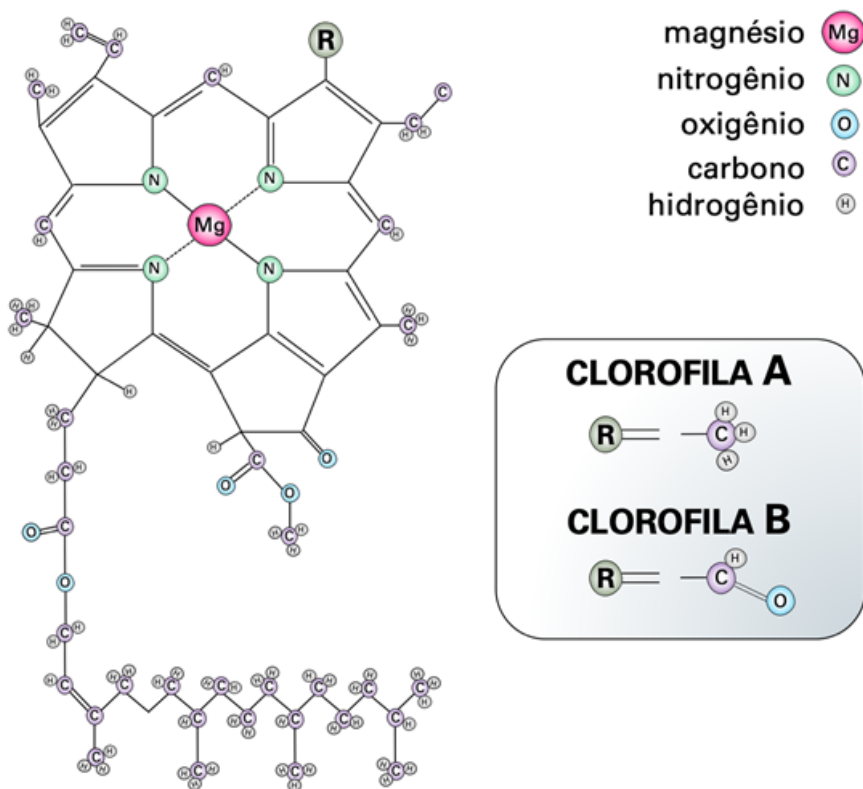


Figura 3. Estrutura química da molécula de clorofila (A e B), constituída por quatro anéis pirrólicos, um átomo central de magnésio ligado aos quatro átomos de nitrogênio (adaptado de Taiz e Zeiger, 1998).

O Mg executa um grande número de funções, em adição ao seu papel estrutural na clorofila. Juntamente com K, é um dos principais ativadores enzimáticos em vegetais, participando diretamente da síntese de carboidratos, ácidos nucleicos e no metabolismo de transferência de energia via trifosfato de adenosina (ATP) (Epstein; Bloom, 2005; Cakmak; Yazici, 2010). Cerca de 75% do Mg foliar está envolvido na síntese proteica (White; Broadley, 2009), atuando como ativador enzimático no metabolismo e incorporação do carbono fotossintético (Cakmak; Kirkby, 2008). Por essa razão, o suprimento adequado de Mg é importante para a soja, uma planta que acumula ao redor de 40% de proteína nos grãos, em uma faixa de variação de 31,7 até 57,9%, em base seca (Pipolo et al., 2015).

Mandarino et al. (2016; 2017; 2018), avaliando o teor de proteínas em 2.581 amostras de grãos coletadas no Brasil, encontraram teores médios variando de 28,7 a 42,0%. Assim, mesmo que o teor de proteína dos grãos seja uma característica com forte dependência genética, a eficiência do processo de síntese de proteínas está diretamente relacionada com o fornecimento adequado de Mg às plantas.

Tanaka et al. (1995) relatam aumento no teor de proteína da soja submetida a doses de calcário dolomítico. Além dos efeitos no metabolismo da proteína, segundo Russell (1942), o fornecimento de Mg é importante, também, para a formação de óleo, e sementes de oleaginosas, são mais ricas em Mg do que sementes que acumulam amido em maiores proporções.

Outro aspecto importante do Mg^{2+} é sua influência positiva na absorção do íon ortofosfato ($H_2PO_4^-$), principal forma de P absorvida pelas plantas (Malavolta, 1976). As interações positivas entre P e Mg são esperadas, uma vez que o Mg é um ativador das enzimas quinases e de muitas reações envolvendo a transferência de fosfato (Fageria, 2001).

Assim como nas plantas, o Mg desempenha importantes funções metabólicas nos animais, e sua deficiência no arraçoamento também causa problemas. A tetania das pastagens, também chamada de hipomagnesemia, é a mais aparente ou conhecida, e é causada pelas baixas concentrações de Mg (Santos, 2011). Esse problema é verificado tanto em bovinos, ovinos e caprinos. Sua distribuição é mundial, e os animais afetados apresentam redução abrupta nas concentrações séricas de Mg e sintomas clínicos que envolvem excitabilidade muscular.

A ocorrência é maior em bovinos de corte e em pastagens com deficiência de Mg e fertilizadas com altas concentrações de nitrogênio (N) e K. Entretanto, é também uma doença metabólica comumente encontrada em vacas de leite e pequenos ruminantes que consomem forragem com altas concentrações de K e proteína bruta. Geralmente, a ocorrência da doença é verificada em regiões subtropicais ou temperadas em decorrência do uso de plantas forrageira que acumulam mais K e N e pouco Mg. Vale lembrar que na própria planta forrageira, o alto teor de K inibe a absorção de Mg.

A tetania das pastagens afeta machos e fêmeas, apesar do que, fêmeas lactantes são mais suscetíveis em decorrência da maior utilização de Mg para síntese de leite, o qual contém cerca de 150 mg/kg de Mg. Quando não tratada, a tetania das pastagens geralmente leva a morte do animal por parada cardíaca e respiratória.

Uma questão que deveria ser avaliada é a relação Ca e Mg na alimentação de não ruminante, tendo em vista à menor variedade de alimentos para a composição de rações, basicamente restrita ao farelo de soja e de milho, a concentração dos dois nutrientes nos grãos e a elevada conversão alimentar de suínos e aves, por exemplo. Como há elevada demanda por Ca em estreita relação do P (Bikker; Blok, 2017), na formulação de rações, e consequente necessidade de suplementação mineral, a relação Ca/Mg pode estar sendo negligenciada, como ocorre nas adubações das culturas, ocasionando uma deficiência pouco aparente nos animais, similar a fome oculta na soja.

A título de curiosidade, 60% ou, ao redor de 25 g de Mg, estão localizados em adultos humanos, onde desempenha um papel central no desenvolvimento do esqueleto (Joy, 2013). E, da mesma forma que verificado na produção vegetal, tem sido bastante comum o registro de deficiência de Mg na dieta da população de alguns países (Karley; White, 2009; White; Broadley, 2009; Rosanoff et al., 2012; Cakmak, 2013). No Brasil, estima-se que cerca de 70% da população ingerem quantidades inadequadas de Mg, especialmente em áreas urbanas (Araujo et al., 2013).

Sempre que se pensa em biofortificação de grãos para uso diretamente na dieta humana ou no arraçoamento de animais, com vistas à prevenção de doenças causadas por carências minerais ou deficiências nutricionais, basicamente o foco está no suprimento de ferro, zinco, selênio e vitaminas, mas quase nunca na oferta de teores adequados de Mg (Gerendás; Führrs, 2013).

Sintomas de deficiência de magnésio nas plantas

Os sintomas de deficiência de Mg podem se manifestar desde os estádios iniciais de desenvolvimento da soja, até no final do enchimento de grãos, dependendo dos teores do nutriente no solo, do manejo nutricional adotado e

da textura do solo. Contudo, são mais frequentemente observados no estágio reprodutivo, durante a fase de enchimento de grãos.

Além do baixo teor de Mg no solo, a deficiência nutricional normalmente está associada à condição de elevada acidez do solo. Em solos de textura arenosa, no entanto, sintomas de deficiência de Mg frequentemente estão relacionados ao manejo inadequado da acidez e teores variáveis de Mg do solo, indicando que a deficiência na absorção do nutriente pode estar sendo inicialmente causada por outro fator que não necessariamente a falta primária de Mg no sistema.

Assim como o N, P e K, o Mg é móvel no floema (Marschner, 2012). Em ambientes com teores baixos de Mg no solo, ou com teores em desequilíbrio com outros íons, o nutriente pode ser redistribuído das folhas mais velhas para as mais novas ou para os frutos. De modo geral, o sintoma de deficiência mais característico é a clorose internerval (amarelo-claro) das folhas velhas, destacando-se a coloração verde ou verde-pálido das nervuras (reticulado grosso), conforme pode ser visto na Figura 4, com teores de K, Ca, Mg e Mn de 19,8 g/kg, 9,4 g/kg, 0,9 g/kg e 211 mg/kg, respectivamente.

Foto: Cesar de Castro



Figura 4. Folhas de soja com sintomas de deficiência de magnésio nas folhas mais velhas, na base das plantas.

A Figura 5 apresenta a dinâmica de acúmulo e de remobilização dos nutrientes Ca, Mg, e K nas folhas do terço superior de plantas de soja com deficiência de Mg, amostradas no estágio R6, em lavoura comercial de soja. O teor de Mg apresenta-se deficiente em todos os estratos de folhas analisadas, mas decresce significativamente de 2,34 g/kg na folha +1 (mais nova) para as folhas +3 (0,81 g/kg) atingindo o mínimo de 0,66 g/kg na folha +7. Esse gradiente indica a remobilização desse nutriente para as folhas mais jovens e, possivelmente com maior atividade fisiológica. O acúmulo de Ca é maior nas folhas mais jovens devido à baixa demanda desse nutriente para acúmulo nos grãos, demonstrada pela menor taxa de exportação do nutriente. E, ao contrário dos nutrientes Ca e Mg, os teores de K são decrescentes da folha +7 para a folha +1, indicando o processo de remobilização do nutriente das folhas para os grãos, principal dreno para acúmulo desse nutriente.

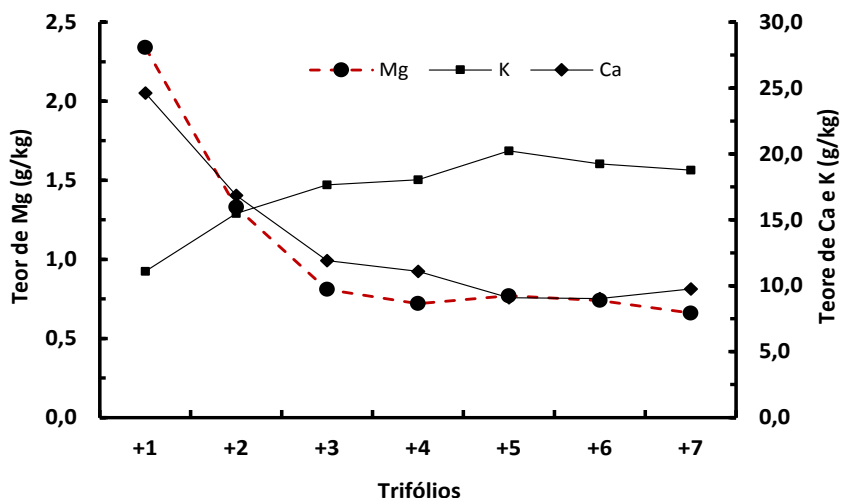


Figura 5. Teores de nutrientes em folhas de soja com sintoma de deficiência de magnésio, em Wenceslau Braz, PR, na safra 2016/2017.

Esse padrão sintomático, característico à várias espécies, está relacionado ao metabolismo de remobilização de nutrientes desencadeado pela deficiência nutricional, que prioriza a degradação e senescência da região internerval, preservando intacta por mais tempo a clorofila presente nas células dos feixes vasculares (Taiz; Zeiger, 1998). Estudos desenvolvidos por Cakmak e Marschner (1992) sugerem que a foto-oxidação de constituintes dos tilacóides são um fator importante no desenvolvimento da clorose nas folhas, pela

deficiência de Mg. Assim, como o Mg está fortemente ligado à molécula de clorofila, a clorose parece ser a resposta tardia à deficiência de Mg (Gransee; Fuhrs, 2013). Contudo, o estágio inicial da deficiência é caracterizado como fome oculta, quando o metabolismo vegetal é afetado e a produtividade reduzida, mesmo na ausência de sintomas visíveis.

Assim como os demais nutrientes móveis no floema, em casos de deficiência, os sintomas típicos de carência ocorrem primeiramente nas folhas mais velhas, no baixeiro das plantas, sendo por esse motivo, mais difícil sua identificação e posterior correção. Com o desenvolvimento da deficiência, a distribuição dos sintomas se estende para as folhas do terço médio, podendo alcançar, em casos mais graves, até as folhas do terço superior, e até na fase de enchimento de grãos (Figura 6), principalmente nas combinações com grande desequilíbrio na relação Ca/Mg e altas doses de K. Em solos com grave deficiência de Mg estes sintomas podem evoluir para necrose entre as nervuras principais com a curvatura do limbo foliar para baixo.

Na Figura 6, é possível observar a deficiência de Mg até as folhas superiores e o resultado da foto-oxidação na destruição dos constituintes dos tilacóides conforme citado por Cakmak e Marschner (1992), que é um fator importante no desenvolvimento da clorose nessas folhas. Esse dano ocorre em função da intensidade luminosa, principalmente quando a deficiência é severa, se estendendo até as folhas superiores das plantas expostas diretamente à luz solar direta, aumentando a intensidade da clorose característica.

Foto: Leandro Zancanaro



Figura 6. Folhas de soja com sintomas de deficiência de magnésio até nas folhas do terço superior, no estágio R6, na Fundação MT, na safra 2013/2014.

Recentemente, uma variação menos característica do sintoma tem ocorrido em lavouras deficientes, dificultando o diagnóstico por parte dos agricultores ou da assistência técnica. Em resposta à menor disponibilidade de Mg no solo, as folhas velhas têm apresentado sintomas de clorose internerval (amarelo-claro) e alteração da coloração das nervuras para tons mais claros de verde ou verde-pálido. Contudo, os bordos foliares mantêm a coloração verde (Figura 7). Nessa lavoura as plantas com folhas com estes sintomas peculiares apresentavam teores de K, Ca e Mg de 22,1 g/kg, 8,12 g/kg e 0,67 g/kg, respectivamente. Na mesma lavoura, áreas sem estes sintomas os teores K, Ca e Mg foram 16,69 g/kg, 7,39 g/kg e 1,36 g/kg, respectivamente. O que se depreende é que mesmo sem apresentar esse sintoma de deficiência de Mg, o teor encontrado denota que a planta também estava com teores abaixo do adequado, o que se traduziria em fome oculta.

Foto: Cesar de Castro



Figura 7. Folhas de soja com sintomas de deficiência de magnésio no centro das folhas mais velhas, e bordos verdes, na base das plantas em solo arenoso, em Bela Vista do Paraíso, PR, na safra 2017/2018.

Estes sintomas têm sido observados em diversas lavouras, regiões e mesmo em áreas experimentais. Ao longo das últimas safras foram analisadas folhas com sintomas de clorose internerval e bordos foliares verdes em algumas áreas de regiões tradicionais do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná e Goiás, mas também em áreas de expansão da cultura da soja como norte do Rio de Janeiro e em Sergipe.

As análises químicas de folhas com esses sintomas atípicos de clorose internerval restrita ao centro foliar, coletadas em uma lavoura de soja no estágio de desenvolvimento R3 no Mato Grosso do Sul (Figura 8), revelaram teores de 1,37 g/kg de Mg nos bordos assintomáticos e deficiência severa de 0,83 g/kg de Mg na área central sintomática. Apesar da remobilização do Mg estar mais acentuada na região central da folha, o diagnóstico geral é de deficiência nutricional, pois os bordos foliares caracterizam-se por situação de fome oculta, pois os teores adequados, considerando o estágio de desenvolvimento das plantas, deveriam estar em torno de 3,0 g/kg de Mg.

Foto: Cesar de Castro

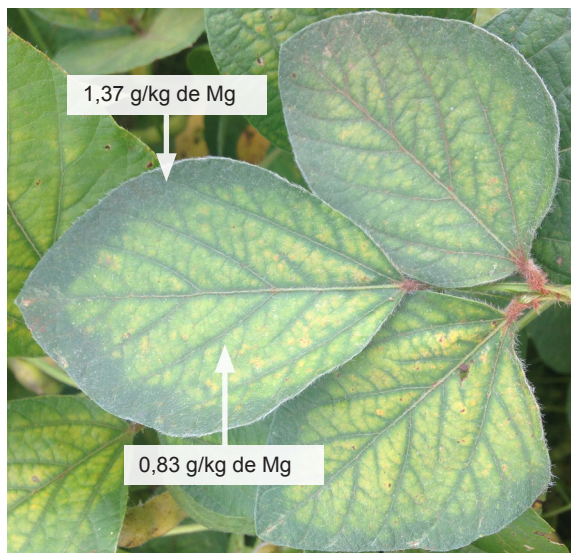


Figura 8. Teor de magnésio nos bordos e no centro de folha de soja com sintomas de deficiência de magnésio.

Nessa área, além da destacada deficiência de Mg nas folhas, outros nutrientes, como o Ca e o K, estão em desequilíbrio ou com teores alterados. Para o Ca, os teores nas folhas eram baixos, ao redor de 8,45 g/kg, enquanto os de K, no centro (19,17 g/kg), e principalmente nos bordos das folhas (26,26 g/kg) eram elevados. A característica singular desse sintoma não é devida somente

à deficiência de Mg, mas sim, a uma combinação de fatores, em que estão envolvidos o Mg, o Ca e o K.

O diagnóstico em condições de campo pode ser particularmente difícil, quando plantas apresentam múltiplos sintomas de desequilíbrio nutricional. Ocorrências simultâneas de deficiência e toxicidade numa mesma planta podem ser encontradas, por exemplo, em solos ácidos e com problemas de acúmulo de água (ambiente redutor), onde tanto a toxidez de Fe ou Mn como a deficiência de Mg podem ocorrer na mesma planta (Marschner, 2012). Essa situação foi verificada em uma lavoura de soja no Paraná (Figura 9), na safra 2016/2017, com plantas apresentando as folhas velhas com sintomas de deficiência de Mg (0,67 g/kg) e simultaneamente as folhas superiores com toxidez de Mn (714 mg/kg). Assim como descrito por Marschner (2012), estas plantas se desenvolviam em solo ácido, com pH (CaCl_2) 4,05 e 0,6 cmol_c/dm³ de Al³⁺, e em área com problemas de acúmulo de água.

Foto: Cesar de Castro

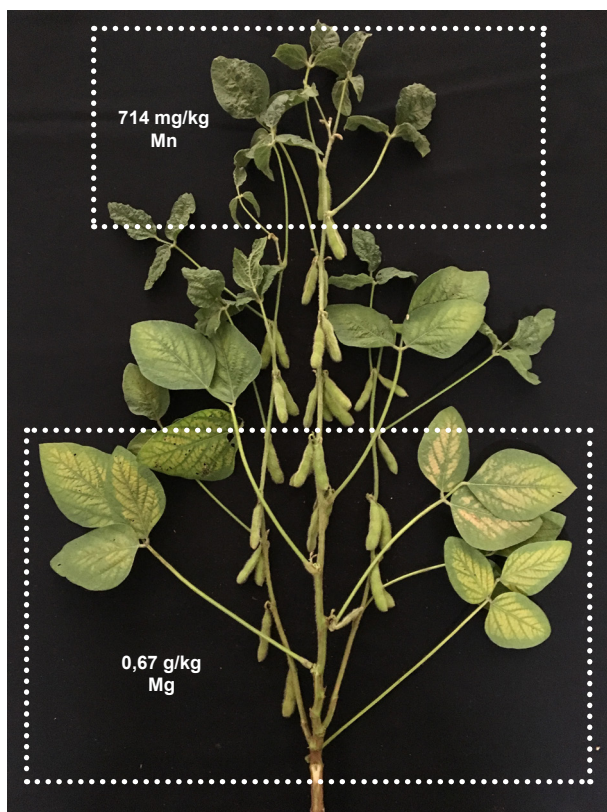


Figura 9. Soja com sintoma de deficiência de magnésio nas folhas inferiores e toxidez de manganês nas folhas superiores.

Os solos de textura arenosa, comuns em áreas de expansão do sistema de produção de grãos, são classificados com aptidão agrícola restrita, com potencial produtivo altamente dependente da tecnologia de manejo das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Portanto, sem o uso de tecnologias adaptadas a esses ambientes de produção, o uso intensivo desses solos, pode ser restrito, principalmente pela baixa capacidade de armazenamento de água e alta suscetibilidade à erosão, dentre outros aspectos.

Trabalhos de longa duração desenvolvidos pela Fundação MT, em solos arenosos (110 g/kg de argila na matriz inorgânica), com combinações de doses de calcário calcítico e dolomítico, mostram o efeito claro da composição dos dois calcários, nos teores de Ca e Mg no solo (Figura 10). Enquanto a relação Ca/Mg era de 6,4 quando toda a calagem foi feita com calcítico, reduziu para 1,6 quando somente o calcário dolomítico foi aplicado. A estreita relação do tipo de calcário nos teores de Ca e Mg e nas suas relações, reforça a importância da escolha do tipo de calcário, não só na correção do solo, como também no balanço de nutrientes no solo.

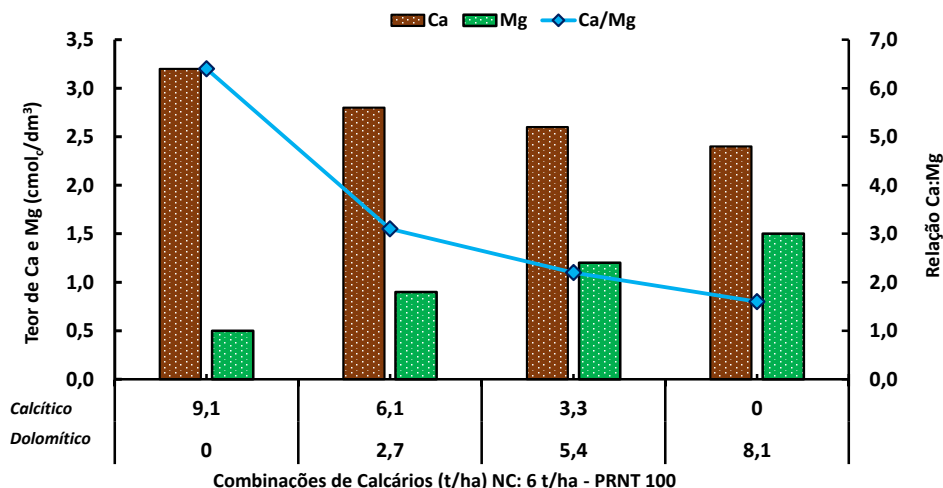


Figura 10. Teores cálcio, magnésio e relação Ca/Mg no solo, em resposta às combinações de doses de calcário dolomítico e calcítico, na Fundação MT, na safra 2014/2015.

Observa-se na Figura 11 que apesar da baixa relação entre a produtividade da soja e a relação Ca/Mg, a menor produtividade da soja foi alcançada com a maior relação (6,4), enquanto a maior produtividade foi conseguida com relação Ca/Mg de 3,1. A menor produtividade alcançada com calcário calcítico pode ser explicada pelo baixo teor de Mg no solo ($0,5 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$), que era o fator limitante à produtividade. Nas demais combinações de calcários, os teores de Mg foram aumentados, variando de $0,9 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ a $1,5 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, suficiente para atender às necessidades das plantas, dependendo da CTC do solo.

Os resultados da Figura 11 reforçam o conceito fundamental que, antes de se falar nas relações entre nutrientes, deve-se primeiro elevar a concentração de Ca e Mg até os teores considerados adequados, para depois se falar na relação desejada.

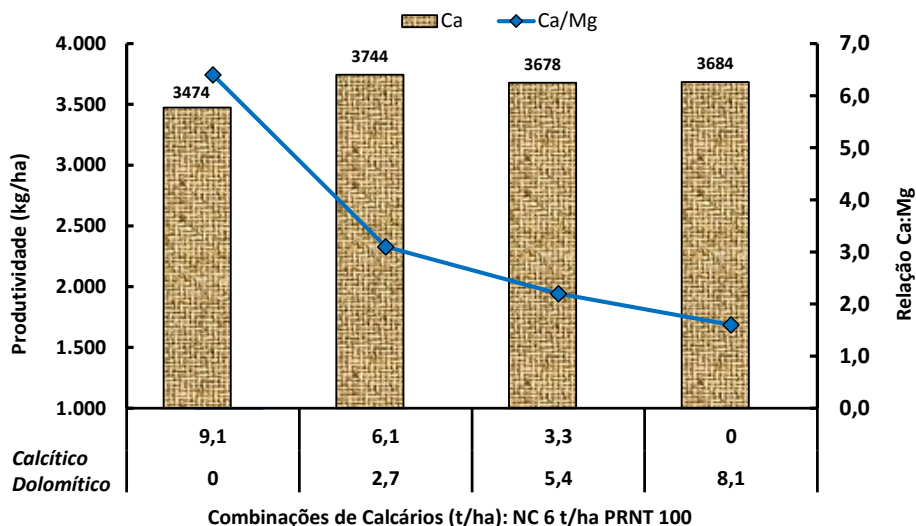


Figura 11. Produtividade da soja e relação Ca/Mg no solo, em resposta às combinações de doses de calcário dolomítico e calcítico, na Fundação MT, na safra 2014/2015.

Os resultados observados em solos de textura arenosa demonstram uma necessidade de maior preocupação não só com as quantidades absolutas dos nutrientes no solo, como a necessidade de maior ajuste na dose de nu-

trientes, em especial o potássio, e tipo de calcário, face ao menor complexo eletronegativo de troca desses solos.

Além das questões de produtividade e sintomas de deficiência, um aspecto pouco discutido são aqueles relacionados à interação do Mg às doenças. Observa-se que o manejo da nutrição com Mg, além de aumentar a produtividade, pode também reduzir doenças, desde que em equilíbrio com outros minerais, sendo assim, uma ferramenta subutilizada (Huber; Jones, 2013) ou pouco reconhecida para o controle de doenças.

O Mg desempenha um papel fundamental na exportação de fotoassimilados no floema, de modo que a deficiência de Mg restringe a partição da matéria seca entre raízes e parte aérea, resultando em acúmulo excessivo de açúcar, amido e aminoácidos nas folhas (Cakmak; Kirkby, 2008). Esse acúmulo, que é fonte de energia (açúcares), propicia o desenvolvimento de doenças nas plantas deficientes.

Assim, para Huber e Jones (2013) a nutrição equilibrada é fundamental para a expressão da resistência a doenças, uma vez que a nutrição é parte de um sistema interdependente e delicadamente equilibrado, influenciado pela genética da planta (cultivar) e pelo meio ambiente.

Além dos sintomas foliares e da fome oculta, a deficiência de Mg pode ter um efeito muito mais insidioso nas plantas, afetando o crescimento radicular e a relação raiz/parte aérea causada pelo acúmulo de fotoassimilados na parte aérea, em detrimento das raízes (Cakmak, 2013), problema que pode se agravar em solos com perfil pouco desenvolvido, ácidos e em plantas sob condições de estresse hídrico, acentuando as perdas de produtividade de grãos.

Importância da análise de solo e de tecido vegetal

Os sintomas característicos de uma deficiência ocorrem porque os mecanismos metabólicos ou estruturais dependentes de um determinado nutriente está em falta ou em grande desbalanço com outros elementos. Mesmo assim, apesar da possibilidade de identificação dos sintomas característicos de

deficiência ou toxicidade, a avaliação visual deve ser usada somente como um suporte para uma avaliação mais científica e criteriosa, que é a análise de solo, complementada pela análise de tecido.

No mundo cada vez mais conectado e com ferramentas tecnológicas ao alcance da maioria dos agricultores e das empresas de consultoria, é no mínimo estranho o anacronismo do uso correto da análise de solo e a raridade da análise de tecido. Os equívocos no manejo da fertilidade do solo, aliado à falta de atenção ou a pouca percepção das relações de causa e efeito, são responsáveis pelo aumento da ocorrência de desequilíbrios nutricionais que limitam a produtividade das lavouras. Merece destaque o fato de as análises de solo não serem feitas com representatividade e com regularidade, além de não serem adequadamente utilizadas como ferramenta de interpretação da disponibilidade de nutrientes no solo e/ou da necessidade de adubação. Outro fato importante é a pobreza de informações sobre o histórico das práticas agrícolas, chuvas e produtividades em cada talhão. Essa tarefa, não obstante o conjunto de planilhas e formulários passíveis de serem utilizados é, quase sempre, inteiramente confiada à memória dos produtores ou de seus gerentes de produção.

Sem parâmetros adequados para o melhor planejamento da adubação, seguramente reduz-se a eficiência do uso dos fertilizantes, com impacto direto nos custos variáveis de produção, podendo resultar em diminuição da produção e perda na qualidade dos grãos.

Como os teores críticos dos nutrientes no solo estão bem estabelecidos, aparentemente, não existem motivos para desvios no modelo de adubação. Esses valores deveriam estar sendo utilizados para interpretação dos teores dos nutrientes no solo e para a recomendação da calagem ou da adubação corretiva.

Nas análises de folhas, apesar dos parâmetros de interpretação também estarem estabelecidos, sua utilização é muito pequena, desperdiçando-se uma ferramenta bastante eficiente para avaliação da nutrição das plantas e do equilíbrio nutricional e manejo dos nutrientes. Basicamente, a diagnose foliar consiste em analisar quimicamente as folhas e interpretar os resultados conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Classes e teores de nutrientes utilizados na interpretação dos resultados das análises de folhas, sem pecíolo, de soja¹ de tipo de crescimento determinado e indeterminado.

Elemento	Baixo	Suficiente ou médio	Alto
	g/kg		
N	< 45,0	45,0 a 65,0	> 65,0
P	< 2,8	2,8 a 4,5	> 4,5
K	< 18,0	18,0 a 25,0	> 25,0
Ca	< 6,0	6,0 a 10,0	> 10,0
Mg	< 2,8	2,8 a 5,0	> 5,0
S	< 2,4	2,4 a 4,0	> 4,0
mg/kg			
B	< 40	40 a 60	> 60
Cu	< 6	6 a 12	> 12
Fe	< 90	90 a 180	> 180
Mn	< 70	70 a 150	> 150
Zn	< 30	30 a 45	> 45

¹Terceiro ou quarto trifólio sem o pecíolo, a partir do ápice da haste principal, coletado no estágio R2/R3, quando a planta estiver em V8/V10.

Fonte: Oliveira Junior et al. (2020).

A coleta de folhas deverá ser criteriosa e realizada quando 50% das plantas do talhão estiverem no estágio correto de amostragem. Para as cultivares de tipo de crescimento determinado é indicado que a amostragem seja efetuada no início do florescimento (estádio R1). Para as cultivares de tipo de crescimento indeterminado, a época recomendada é quando 50% das plantas do talhão estiverem no florescimento pleno (estádio R2 - flores abertas em um dos dois nós superiores da haste principal com folha completamente desenvolvidas), podendo-se estender até o início do estágio R3 (Início de desenvolvimento da vagem), desde que as plantas também estejam no estágio vegetativo V8/V10 (7 a 9 trifólios completamente desenvolvidos). Deve-se colher, por talhão, em torno de 30 folhas recém-maduras que, de modo geral, correspondem à terceira ou quarta folha a partir do ápice da haste principal.

No Anexo 1, são apresentados os estádios de desenvolvimento da soja com tipo de crescimento determinado e indeterminado (Oliveira Junior et al., 2016).

É importante que a análise de solo e a análise foliar, que pode ser interpretada por tabelas de faixas de suficiência ou mesmo pelo DRIS (*Diagnosis and Recommendation Integrated System*) regionalizado (DRIS, c2003), seja utilizada para a elaboração de diagnósticos e recomendações de manejo da calagem e da adubação.

Essa análise, além de possibilitar o monitoramento da evolução da lavoura ao longo das safras, é necessária, pois nem sempre a identificação visual é suficiente para a avaliação completa do estado nutricional das plantas, tendo em vista que as relações entre os nutrientes podem ser mais importantes que a identificação isolada de um único elemento problema.

Como aplicação prática da avaliação da diagnose visual tem-se a possibilidade de identificação da necessidade de aplicação de determinado nutriente que estaria limitando a produção ou, mais amplamente, o ajuste no programa de adubação. Contudo, a decisão final só será eficientemente tomada, a partir da diagnose foliar, através da análise química das folhas das plantas com algum sintoma visual, comparando-as com as análises das folhas das plantas consideradas normais.

Magnésio nos sistemas de produção

No manejo da fertilidade do solo, o critério técnico para a recomendação de adubação baseia-se nas exigências nutricionais das plantas e no potencial de resposta da cultura, priorizando-se de forma consciente a aplicação de macronutrientes primários por meio das formulações NPK, ou pela aplicação de fontes simples e de inoculantes para a promoção da fixação biológica do nitrogênio. Diferentemente, os demais nutrientes são fornecidos indiretamente como acompanhantes das fontes aplicadas, muitas vezes sem considerar suas concentrações ou a necessidade das plantas para o cálculo da sua recomendação. Isto é mais observado no caso dos calcários, que possuem teores variáveis de Ca e Mg, ou no caso do gesso, fonte de Ca e enxofre (S) e até com os fertilizantes orgânicos, os organominerais e os condicionadores de solo.

A calagem, que é a principal forma de fornecimento de Ca e Mg às plantas, eleva o pH do solo, reduz a concentração de Al tóxico e aumenta a disponi-

bilidade de nutrientes, pois aumenta a CTC efetiva. Contudo, a relação entre os teores de Ca + Mg, fornecidos principalmente pela calagem, ou no caso específico do Ca, fornecido pelo gesso e de K, fornecido pelo KCl, não deve ser muito elevada (Usherwood, 1982). Mesmo assim, a correlação entre a relação (Ca+Mg)/K trocáveis no solo e a produção de matéria seca pelas plantas não tem apresentado resultados satisfatórios para solos e culturas distintos (Usherwood, 1982) e para a soja (Rosolem et al., 1992).

Para Oliveira et al. (2001), quando a relação (Ca+Mg)/K trocável é menor que 20, a maior disponibilidade de K no solo promove um efeito mais acentuado de inibição competitiva na absorção de Mg do que de Ca.

Kopittke e Menzies (2007) analisaram dados de experimentos conduzidos nos Estados Unidos e concluíram que em solos que apresentam teores disponíveis de cátions trocáveis acima dos teores críticos, a relação de saturação entre cátions na CTC não influencia a produtividade das respostas das culturas do solo e a aplicação desse conceito pode levar ao uso ineficiente de insumos.

O que se depreende das relações Ca, Mg e K, é a importância fundamental dos teores dos nutrientes estarem acima dos teores crítico de suficiência, conforme destacado por Barber (1984), Quaggio (2000) e Kopittke e Menzies (2007).

Para os macronutrientes primários, o critério para o manejo da adubação considera as exigências nutricionais das plantas e potencial de resposta, resultando em aplicações em todas as culturas que compõem os sistemas de produção e em todas as safras. Portanto, a reposição nutricional é realizada na mesma frequência que o cultivo, mesmo que as quantidades não sejam adequadas ou balanceadas com as exportações.

Para o Mg, no entanto, o principal critério para o manejo da adubação não é a exigência nutricional das plantas. A principal fonte desse nutriente é o calcário dolomítico, cujo objetivo principal é a correção da acidez, com consequente efeito secundário de elevação da saturação por base (V%) pelo fornecimento de Ca^{2+} e Mg^{2+} .

A decisão de utilização do calcário baseia-se na relação Ca/Mg esperada, por exemplo, 3:1, que pode variar em função das doses do corretivo aplicadas.

Essa relação deve ser entendida como critério secundário de interpretação, devendo-se priorizar o atingimento dos teores críticos de Mg no solo, para atender as necessidades das culturas. Afinal, uma relação 3:1 pode ser conseguida com diferentes teores de Ca e de Mg, conforme observado na Tabela 3. Contudo, apenas os exemplos que consideram o teor crítico dos nutrientes podem ser considerados adequados, enquanto os demais, evidenciam risco de desbalanço com os demais nutrientes no complexo de troca, por processos competitivos de absorção pelas plantas (Oliveira Junior et al., 2020).

Tabela 3. Relações cálcio, magnésio e potássio em função de teores hipotéticos dos nutrientes no solo.

Teores no solo (cmol _c /dm ³)			Relações		
Ca	Mg	K	Ca/Mg	Mg/K	(Ca+Mg)/K
0,9	0,3	0,3	3,0	1,0	4,0
1,8	0,6	0,3	3,0	2,0	8,0
3,6	1,2	0,3	3,0	4,0	16,0
7,2	2,4	0,3	3,0	8,0	32,0
10,8	3,6	0,3	3,0	12,0	48,0

Em áreas com problemas de acidez subsuperficial e indicação de recomendação de gesso agrícola, deve-se considerar o balanço final de bases trocáveis no solo para evitar a redução da disponibilidade de Mg²⁺, pois a aplicação desse insumo eleva as concentrações Ca²⁺ e SO₄²⁻ trocáveis, com possível efeito residual por alguns anos e interação com outros íons no equilíbrio do complexo de troca e nas interações no processo de absorção.

O que se denota dessas duas práticas, no manejo da calagem e da gessagem, geralmente aplicadas a lanço e em superfície, é uma grande preocupação com os possíveis efeitos diretos destas práticas na acidez do solo e da neutralização do Al tóxico em subsuperfície, sem a criteriosa preocupação com os possíveis efeitos indiretos nas relações nutricionais, especificamente com o Ca/Mg e K/Mg (Cakmak, 2015).

Assim, o aumento do teor de um nutriente, em função do manejo inadequado da adubação, calagem ou gessagem, causando desequilíbrio desse nutriente em relação aos demais, pode implicar na redução da absorção de outros

nutrientes, principalmente nos primeiros centímetros de solo, região de maior concentração dos nutrientes e de raízes. Como observação, algumas áreas de soja com sintomas de deficiência de Mg foram encontradas em talhões que receberam grandes quantidades de gesso ou mesmo calcário calcítico (Bergmann, 1992). Na Figura 12, observa-se foto de folha de soja com deficiência de Mg em função da aplicação de gesso (~ 3 t/ha), em área com baixo teor de Mg e relação Ca/Mg superior a 4.

Foto: Cesar de Castro



Figura 12. Soja com sintoma de deficiência de magnésio nas folhas inferiores em função da aplicação de dose elevada de gesso.

Outra situação afeta a absorção de Mg e de cálcio nas plantas, é a interação negativa entre o aumento nos teores de K no solo e redução dos teores dos nutrientes nas folhas. Portanto, manejos que privilegiam doses elevadas de K ou solos com elevados teores do nutriente no solo, podem conduzir à menor absorção de Mg e até de Ca, com reflexos nos teores dos nutrientes nas folhas e possível redução da produtividade.

Conforme se observa na Figura 13 há uma relação inversa entre o aumento dos teores de K no solo e o decréscimo nos teores de Ca e Mg nas folhas. Nestes experimentos, não obstante os teores de Ca e de Mg nas folhas não

terem caído abaixo dos níveis adequados (Tabela 2), em solos com teores limítrofes dos dois nutrientes, esse manejo poderia reduzir, ainda mais, os teores de Ca e de Mg nas folhas, para teores abaixo dos adequados, com reflexos na produtividade.

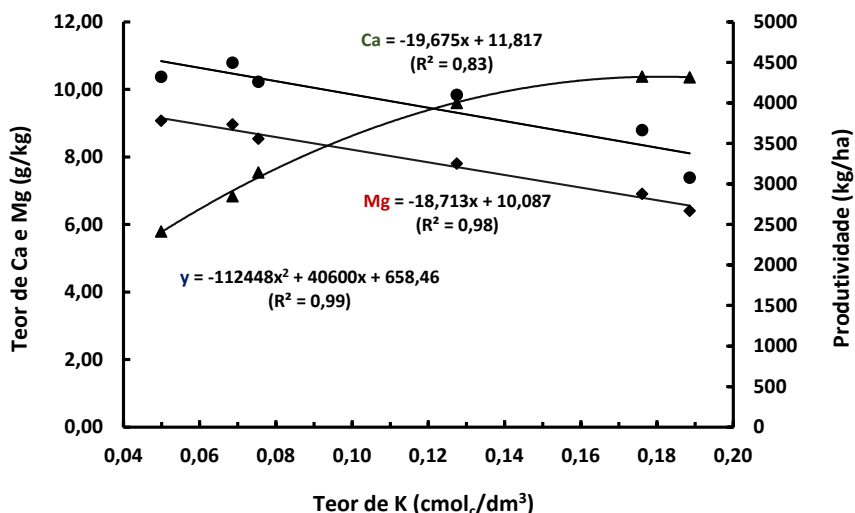


Figura 13. Teores de cálcio, magnésio nas folhas (estádio R2) e produtividade da soja, em função dos teores de potássio no solo, em Londrina, PR, na safra 2017/2018.

Quanto à adubação, Firmano et al. (2019) reportaram redução nos teores de Ca e Mg em folhas diagnóstico de soja com o aumento de doses de K. Segundo os autores, o excesso de K no solo devido as altas doses empregadas foi mais severo para o Mg, cujas concentrações decresceram de modo não linear até valores de ~4 g/kg, enquanto para Ca, o decréscimo foi linear até ~8 g/kg.

O aumento isolado dos teores trocáveis de Ca, Mg ou K decorrentes das práticas de calagem, gessagem ou adubação, pode não inibir significativamente a absorção de outro nutriente. Contudo, a negligência de aplicação dos critérios de balanço nutricional e reposição de perdas e exportações para o cálculo da adubação e correção da fertilidade do solo pode, com o tempo, resultar no desequilíbrio entre os nutrientes e, então, desencadear o aparecimento de sintomas nas plantas, evidenciando a deficiência nutricional e redução do potencial produtivo da lavoura.

Experimentos conduzidos no Paraná desde a década de 1990, com doses de potássio no solo, evidenciam o efeito antagônico entre o aumento dos teores de K nas folhas, em função do aumento das doses de potássio no solo, e o decréscimo nos teores de magnésio nas folhas nos estádios R2 (Figura 14), ocorrendo as maiores produtividades da soja, nos intervalos entre 18 a 25 g/kg de K e de 2,8 a 5 g/kg de Mg, nas folhas.

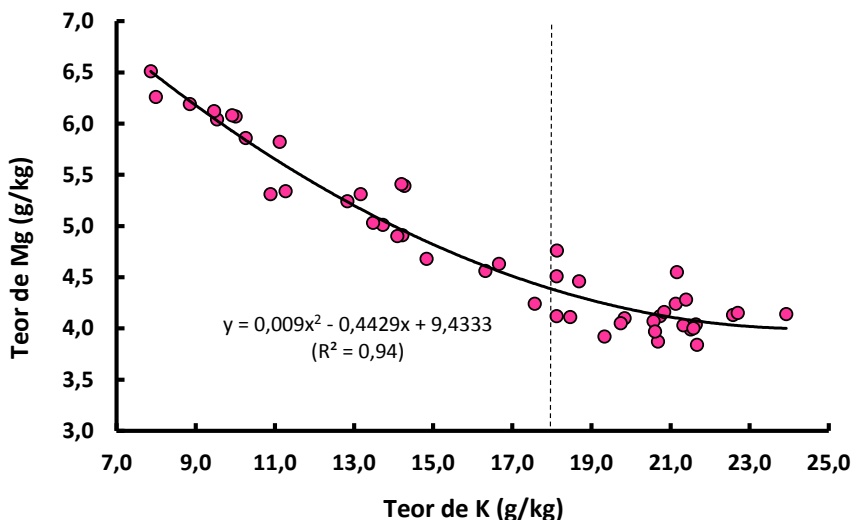


Figura 14. Interação entre o teor de potássio e de magnésio nas folhas (estádio R2), em função dos teores de potássio no solo, em Londrina, PR, na safra 2015/2016.

Outra questão importante a ser considerada são os processos de exportação dos nutrientes pelas culturas e outras formas de perdas de Mg^{2+} do complexo de troca, principalmente nos primeiros centímetros do solo, em função da forma de aplicação de corretivos, gessagem e adubação, e as diferentes forças erosivas, principalmente em áreas com declive e pouca capacidade de infiltração, sem a proteção dos restos culturais ou de culturas de cobertura.

Pelo conjunto de razões apresentadas, o magnésio pode ser considerado um “elemento esquecido” no manejo da fertilidade do solo (Cakmak; Yazici, 2010). O que se depreende desse quadro é que a deficiência de Mg está se tornando cada vez mais um importante fator que pode limitar o alcance de elevadas produtividades, em sistemas intensivos de produção agrícola, especialmente em solos fertilizados apenas com N, P e K.

A depleção do magnésio nos solos e o “esquecimento” da importância fundamental do nutriente no metabolismo das plantas é uma preocupação crescente para a agricultura de alta produtividade.

Absorção e acúmulo de magnésio na soja

A absorção de nutrientes nas plantas é determinada por fatores genéticos e edafoclimáticos que se relacionam com a produção de massa de Matéria Seca Total (MST) e a concentração de nutrientes na planta. Na Tabela 4 são apresentadas as quantidades médias de nutrientes acumuladas pela parte aérea das plantas de cinco cultivares de soja, com grupo de maturidade relativa variando de 5.8 a 6.3 e produtividade média de 3,4 t/ha de grãos e 8,9 t/ha de MST.

A absorção de nutrientes geralmente é proporcional ao acúmulo de MST [Matéria seca da parte aérea (MSPA) + matéria seca das raízes]; contudo, devido a variação no Índice de Colheita Aparente - ICA¹ e ao efeito de diluição/concentração dos nutrientes, maiores quantidades de nutrientes absorvidas não resultam, necessariamente, em aumentos na produtividade de grãos, mostrando, indiretamente, a maior ou menor eficiência das plantas. Já as quantidades exportadas (Tabela 4) são diretamente proporcionais à produtividade (matéria seca de grãos - MSG) e a concentração dos nutrientes nos grãos.

Portanto, a reposição dos nutrientes exportados, principalmente em solo com teores acima do nível crítico, também é um critério essencial para a recomendação de adubação da soja e a manutenção da disponibilidade dos nutrientes do solo em níveis adequados, sendo necessário, contudo, o monitoramento da fertilidade o solo.

¹ ICA = MSG / MSPA

Tabela 4. Quantidade de nutrientes **ACUMULADA** e **EXPORTADA** pela cultura da soja¹

Partes da Planta	Nutrientes										
	N	P ⁽⁴⁾	K ⁽⁴⁾	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	kg/ha						g/ha				
Grãos ⁽²⁾	187	16,6	61	10	9	9,5	106	39	223	135	142
Restos Culturais	83	6,8	104	66	28	4,9	177	29	1062	545	116
Total ⁽³⁾	270	23,4	165	76	37	14,4	283	68	1285	680	258
% Exportada	69	71	37	13	24	66	38	58	17	20	55
kg/t de grãos						g/t de grãos					
Grãos	54	4,8	18	2,8	2,5	2,8	31	11,5	65	39	41
Restos Culturais	24	2,0	30	19,3	8,2	1,4	51	8,3	310	159	34
Total	78	6,8	48	22,1	10,7	4,2	82	19,8	375	198	75

⁽¹⁾.Cultivares: Cv.1: BRS 360RR, Safra 2011/2012, GMR 6,2, Índice de Colheita Aparente (ICA) 0,445; Cv.2: BRS 1010IPRO, Safra 2014/2015, GMR 6,1, ICA 0,408; Cv.3: BRS 360RR, Safra 2010/2011, GMR 6,2, ICA 0,396; Cv.4: V-Top RR, Safra 2013/2014, GMR 5,8, ICA 0,301; Cv.5: DM 6563IPRO, Safra 2014/2015, GMR 6,3, ICA 0,407; ⁽²⁾.Quantidade de nutrientes contida nos grãos das plantas no estágio final de desenvolvimento (R8, maturação plena) - Umidade base 14%; ⁽³⁾.Quantidade de nutrientes contida no tecido vegetal das plantas no estágio de Máximo Acúmulo de Matéria Seca (R6); ⁽⁴⁾.Fatores de conversão: P → P₂O₅ = multiplicar por 2,29; K → K₂O = multiplicar por 1,21.

Fonte: Oliveira Junior et al. (2020).

Conforme pode ser observado na Tabela 4, a ordem de extração de nutrientes pela soja obedece a seguinte ordem de prioridade: N > K > Ca > Mg > P > S, enquanto a ordem de exportação de nutrientes (quantidade contida nos grãos) é: N > K > P > Ca = Mg = S. O que se depreende da Tabela e da ordem de extração e exportação de nutrientes é que, para cada tonelada de grãos de soja, retiradas da lavoura, são exportadas pelos grãos, ao redor de 2,5 kg de Mg, quantidade similar às de cálcio e de enxofre. Apesar da necessidade de reposição destes nutrientes, nos manejos da adubação não é dada ao Mg a mesma atenção que aos demais macronutrientes. Por outro lado, é possível manter o equilíbrio e os teores críticos de cátions no solo, com o monitoramento da fertilidade e do manejo da acidez e da adubação.

Em termos absolutos, considerando as curvas de acúmulo de Mg avaliadas para quatro cultivares (Figura 15), a quantidade absorvida do nutriente é de

aproximadamente 35 kg/ha, ao passo que as quantidades exportadas variaram entre 7,5 e 10 kg/ha, dependendo da produtividade dos materiais. Com base nas quantidades absorvidas e exportadas (Tabela 4) e na dinâmica de acúmulo de Mg (Figura 15) é possível inferir que em solos com teores adequados de Mg, K e Ca, muito embora as quantidades disponíveis atendam às necessidades da cultura, a absorção/demanda de Mg^{2+} da soja é muito menor do que às de K^+ e de Ca^{2+} . Dessa forma, deficiências de Mg podem ser mais facilmente induzidas por uma menor variação no teor do nutriente no solo, bem como pelo excesso de Ca e de K, reforçando a necessidade de maior atenção nos manejos da adubação e de correção da acidez do solo.

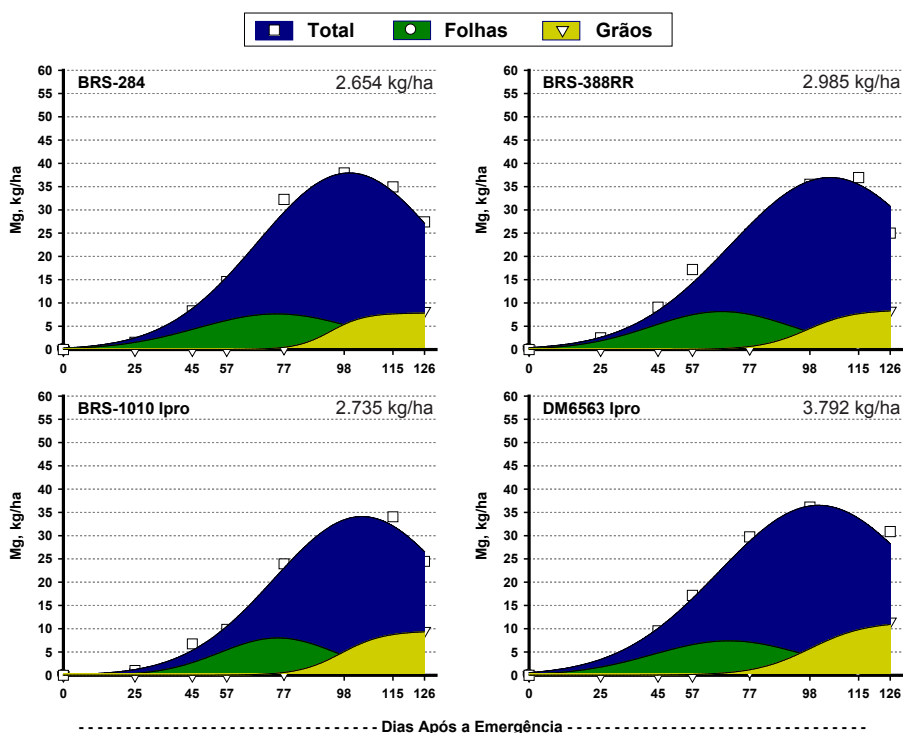


Figura 15. Curvas de acúmulo de Mg por quatro cultivares de soja. Londrina – PR, safra 2015/2016.

Estratégias de correção do magnésio no solo

A adubação com Mg não é uma prática agrônômica realizada de maneira regular ou consciente, como no caso do N, P e K já que, geralmente, o Mg é tratado como um nutriente secundário. Contudo, como a Lei do Mínimo de Justus von Liebig, de 1840, é uma verdade inconteste e ainda está em vigor, o teor de Mg no complexo de troca em quantidades adequadas para o metabolismo das plantas é fundamental para obtenção de elevadas produtividades. Como existe uma relação entre os teores de nutrientes no solo e a produtividade das culturas, cada vez mais, serão os detalhes no manejo da fertilidade do solo que poderão sustentar maiores produtividades e composição adequada dos grãos.

Como o Mg é primariamente aplicado no solo na prática da calagem, que além das demais transformações químicas no solo, eleva os teores de Ca e de Mg, é, principalmente por meio da calagem, que deveríamos equilibrar as relações destes cátions no solo (Ca/Mg).

Entretanto, quando não for possível ou não existir um equilíbrio entre os cátions, em função de graves desequilíbrios no complexo de troca, ou mesmo, se a deficiência de Mg no solo for grave, existem algumas possibilidades de correção total ou parcial. Estas possibilidades são estritamente técnicas, não levando em consideração os aspectos econômicos ou de logística, que devem ser avaliados em cada situação.

Conforme se observa na Tabela 5, algumas fontes de Mg contêm, também, Ca, que deve ser levado em consideração quando da tomada de decisão no manejo da adubação. Essa preocupação se deve ao fato de que, se a relação Ca/Mg da fonte não for propícia para o ajuste do teor de Mg no solo, a mesma não será a melhor opção, podendo causar um desequilíbrio ainda maior.

Com relação aos calcários, mesmo que a legislação atual não os classifique em calcítico, magnesiano e dolomítico, existem calcários com diferentes concentrações de Ca e de Mg, desde aqueles constituídos basicamente de Ca, até outros com elevada concentração de Mg (Sousa et al., 2007).

Tabela 5. Fontes comerciais de magnésio utilizadas no Brasil.

Fontes	Composição (%)	Observações
Corretivo		
Calcário dolomítico	>12 de MgO (CaO + MgO > 38)	Corretivo de acidez CaCO₃.MgCO₃
Fertilizantes e outras fontes¹		
Óxido de Magnésio	45 a 52 de Mg	Características de correção de acidez Magnésio total como MgO (Calcinação da Magnesita)
Carbonato de Magnésio	25 de Mg	Características de correção de acidez Magnésio total como MgCO ₃ (Moagem e tamisação da magnesita)
Kieserita	15 de Mg 20 de S	Mg solúvel em água - MgSO ₄ .H ₂ O
Termofosfato	3,50-10 de Mg 14,5 a 18 de Ca 16,5 a 18 de P ₂ O ₅ 6 de S	Características de correção de acidez (Tratamento térmico da rocha fosfática, com compostos calcítico, magnesiano e silícico)
Sulfato de K e Mg	10 de Mg 20 de K ₂ O 20 de S	Mg solúvel em água - K ₂ SO ₄ .Mg SO ₄
Polihalita	3,6 de Mg 14 de K ₂ O 12 de Ca 19 de S	K ₂ SO ₄ .MgSO ₄ .2CaSO ₄ . 2H ₂ O
Silicato de Magnésio	21% de Mg 24% de Si	MgSiO ₃

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

Conforme pode ser observado na Tabela 5, além da escolha do calcário dolomítico, ou calcários com diferentes concentrações de Mg, para o manejo da acidez e balanço de Ca e Mg, outras fontes podem ser utilizadas para elevação da saturação de Mg no complexo de troca, algumas delas com elevada concentração de Mg. Outra possibilidade pode ser a utilização de fertilizantes, com concentração variável do nutriente, mas que podem compor o manejo da adubação e a correção da deficiência de Mg.

Observar que, algumas fontes contêm outros nutrientes, que devem ser considerados, como o Ca, que pode afetar o balanço de Ca/Mg e apresentar características de correção da acidez. Algumas fontes possuem outros elementos, como K, S ou micronutrientes, por exemplo, que devem ser considerados no manejo da adubação, sendo um diferencial positivo da fonte.

Estudos desenvolvidos por Castro (1991) com termofosfatos produzidos com rochas oriundas do Complexo Alcalino - Ultramáfico - Carbonatítico de Maicuru, PA, demonstraram que os termofosfatos, além de elevar o teor de P no solo, são importantes fontes de Mg, além de Ca para o solo.

No contexto geral, a correção do solo e a adubação devem ser realizada a partir de critérios técnicos. Para tanto, a análise química de solo e de tecido, são ferramentas eficientes para avaliar a efetividade das operações. Outra possibilidade é o índice de atendimento às exportações de nutrientes (IAExp) que é calculado a partir do balanço da adubação e indica se o manejo está em equilíbrio. Para tanto, foi desenvolvida a plataforma AFERE (Avaliação da Fertilidade do Solo e Recomendação da Adubação), que numa primeira etapa (módulo 1) calcula o balanço da adubação através da correlação entre as produtividades das culturas e os valores exportados de nutrientes, e indica a necessidade de adubação visando, no mínimo, a reposição dos nutrientes retirados do solo e exportados pelos grãos.

O ajuste na adubação possibilitará que os teores dos nutrientes no solo continuem adequados, fazendo com que a fertilidade do solo, considerando principalmente os aspectos químicos, não seja um fator limitante à obtenção de altas produtividades.

O acesso à plataforma AFERE está disponível no endereço: <www.embrapa.br/soja/afere>.

Considerações finais

O manejo da adubação para altas produtividades da soja não pode ser avaliado isoladamente, uma vez que os fatores, químicos, físicos e biológicos estão interligados. Contudo, o pH do solo e os níveis críticos de nutrientes constituem os principais indicadores que determinam a recomendação de

adubação. Adicionalmente, as relações entre Ca/Mg, Mg/K, (Ca+Mg)/K, além de outras relações e as interações entre nutrientes devem ser observadas de forma complementar como critério de interpretação da fertilidade do solo e manejo da adubação.

Nos últimos anos o rendimento da soja no Brasil tem crescido, não só em função ao aumento do potencial de rendimento das cultivares, como também da melhoria do ambiente produtivo, onde se destaca o manejo do solo. O aumento dos patamares de produtividade, que podem superar os 6.000 kg/ha, está exigindo, além de maior quantidade de fertilizantes, uma adubação mais equilibrada que considere não só as quantidades adequadas dos nutrientes P e K, mas também as suas relações com outros nutrientes, como o Ca, Mg e S, além dos micronutrientes.

Outra questão importante é que os fertilizantes têm uma participação significativa nos custos variáveis de produção, com grande impacto na rentabilidade da cultura, sem nada que indique, a médio prazo, mudanças nessa realidade. Para a elaboração de uma estratégia de aumento de produtividade, além da escolha de cultivares mais adaptadas a cada região, é necessário ter conhecimento da fertilidade do solo e da necessidade da calagem/gessagem e fazer a aplicação das quantidades adequadas de macro e micronutrientes, não esquecendo das possíveis interações com o Mg. Esse é um grande passo para o sucesso da atividade agrícola.

Para tanto, a coleta criteriosa de amostras de solo, independentemente do aparecimento de sintomas nas plantas, a análise cuidadosa e a interpretação precisa dos resultados é um dos primeiros passos para a possível correção de problemas de fertilidade do solo. A análise foliar, apresenta-se como uma possibilidade complementar à interpretação das análises de solo e capaz de identificar as deficiências ou excessos de nutrientes que estariam comprometendo a alta produtividade da soja.

A utilização da análise foliar como critério de diagnóstico é baseada na premissa de que existe uma relação significativa entre o suprimento de nutrientes e seus respectivos teores no solo, e que aumentos ou decréscimos nas concentrações estão relacionados a produções mais altas ou mais baixas, respectivamente. Como a Lei do Mínimo de Justus von Liebig, do século XIX,

continua sendo verdadeira, não existe nenhum motivo para que não seja aplicada, também ao caso do Mg.

Uma possível explicação para o aumento dos problemas de deficiência ou toxicidade de nutrientes em lavouras de soja, assim como em outras culturas agrícolas, é a pouca importância dada ao equilíbrio nutricional no metabolismo das plantas e, talvez, o mais importante, à posição dos sintomas nas plantas. Por ser móvel no floema, os sintomas típicos de carência de Mg, ocorrem primeiramente nas folhas mais velhas, o que torna mais difícil a sua visualização e identificação, mesmo com tecnologias de captação de imagem.

Com essas considerações, identifica-se a necessidade de melhorar as avaliações técnicas para possibilitar um manejo adequado da adubação, com atenção a todos os nutrientes, proporcionando altas produtividades e grãos de soja mais ricos e nutritivos para uso na alimentação humana ou animal.

A identificação de sintomas de deficiência ou de toxidez nutricional nas culturas agrícolas é o primeiro e importante passo para a busca da solução do problema, porém, não basta identificarmos um sintoma nutricional em plantas, seu agente causal e as explicações bioquímicas e fisiológicas. Temos que agir para resolver o problema. Por esse motivo, acrescentamos as possíveis fontes comerciais de Mg para facilitar a escolha do agente que irá proporcionar o controle ou a solução do problema.

É interessante observar que ainda hoje, 520 anos após o descobrimento do Brasil, quando o fidalgo português Pero Vaz de Caminha, que se notabilizou como escrivão da armada de Pedro Álvares Cabral, vaticinou, diante do esplendor da Mata Atlântica, das águas e da terra, “DAR-SE-Á NELA TUDO”, ainda há quem acredite que a adubação não seja um dos fatores de maior peso na formação da produtividade. Desse fragmento da carta, que nasceu o “EM SE PLANTANDO TUDO DÁ”, expressão usada até hoje e que designava que a terra era fértil, cultiva-se um engano até os dias atuais. Na verdade, Caminha, que não era agrônomo, não entendeu os motivos da pujança da natureza da região. O Brasil, para sustentar a produção de mais de 251 milhões de toneladas de grãos, é um grande consumidor de fertilizantes, não existindo a médio prazo, previsão de mudanças nesse cenário. O que temos e o que nos distingue dos demais países é área, água, sol e tecnologia.

Referências

- ALBRECHT, W. A. **The Albrecht Papers: foundation concepts**. Volume I. Greeley: Acres U.S.A., 1996. 515 p. Edited by Charles Walters.
- ARAÚJO, M. C.; BEZERRA, I. N.; BARBOSA, F. S.; JUNGER, W. L.; YOKOO, E. M.; PEREIRA, R. A.; SICHIERI, R. Macronutrient consumption and inadequate micronutrient intake in adults. **Revista de Saúde Pública**, v. 47, supl. 1, p. 177S-189S, 2013. DOI: 10.1590/S0034-89102013000700004.
- ARNOLD, P. W. Magnesium and potassium supplying power of soils. In: POTASSIUM and Magnesium. London: Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Her Majestys Stationery Office, 1967. p. 39-48. (H.M.S.O. Technical Bulletin, 14).
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**. New York: John Wiley, 1984. 398 p.
- BATAGLIA, O. C.; FERRAREZI, R. S.; FURLANI, P. R.; MEDINA, C. L. **Projeto fósforo no sistema de plantio direto: relatório final - fósforo**. Piracicaba: Fundação Agrisus, 2009. 30 p. (Projeto Agrisus PA-541-09).
- BEAR, F. E.; PRINCE, A. L. Cation-equivalent constancy in alfafa. **Journal of America Society of Agronomy**, v. 37, p. 217-222, 1945.
- BEAR, F. E.; TOTH, S. J. Influence of calcium on availability of other soil cations. **Soil Science**, v. 65, p. 69-74, 1948.
- BERGMANN, W. **Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis**. Jena: Gustav Fischer Verlag, 1992. 386 p.
- BIKKER, P.; BLOK, C. M. **Phosphorus and calcium requirements of growing pigs and sows**. Wageningen: Federatie Nederlandse Diervoederketen, 2017. 74 p. (CVB documentation report, 59). DOI: 10.18174/424780.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa n. 39, de 8 de agosto de 2018. Ficam estabelecidas as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, registro de produto, autorizações, embalagem, rotulagem, documentos fiscais, propaganda e tolerâncias dos fertilizantes minerais destinados à agricultura. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 154, p. 19-32, 10 ago. 2018. Seção 1. Disponível em: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=10/08/2018&jornal=515&pagina=19&totalArquivos=185>. Acesso em: 9 dez. 2019.
- CAIRES, E. F. Controle da acidez e melhoria do ambiente radicular no sistema plantio direto. In: FONSECA, A. F. da; CAIRES, E. F.; BARTH, G. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas no sistema plantio direto**. Ponta Grossa: AEACG: UEPG, 2011. p. 23-68.
- CAKMAK, I. Magnesium in crop production, food quality and human health. **Crop & Pasture Science**, v. 66, n. 12, p. i-ii, 2015. DOI: 10.1071/CPv66n12_FO.
- CAKMAK, I. Magnesium in crop production, food quality and human health. **Plant and Soil**, v. 368, p. 1-4, 2013. DOI: 10.1007/s11104-013-1781-2.
- CAKMAK, I.; HENGELER, C.; MARSCHNER, H. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 45, p. 1251-1257, 1994. DOI: 10.1093/jxb/45.9.1251.

- CAKMAK, I.; KIRKBY, E. A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photo oxidative damage. **Physiologia Plantarum**, v. 133, p. 692-704, 2008. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2007.01042.x.
- CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. **Plant Physiology**, v. 98, p. 1222-1227, 1992.
- CAKMAK, I.; YAZICI, A. M. Magnesium: a forgotten element in crop production. **Better Crops With Plant Food**, v. 94, n. 2, p. 23-25, 2010.
- CASTRO, C. de. **Avaliação agrônômica de termofosfatos magnesianos fundidos, produzidos a partir de minérios oriundos de Maicuru-PA**. 1991. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Belém.
- CATANI, R. A.; GALLO, J. R. Avaliação da exigência em calcário dos solos do estado de São Paulo, mediante correlação entre o pH e a porcentagem de saturação em bases. **Revista de Agricultura**, v. 30, p. 49-60, 1955.
- DRIS. **Diagnóstico nutricional para soja**. Londrina: Embrapa Soja, c2003. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/dris/>. Acesso em: 2 jun. 2020.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2nd. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 400 p.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. Boca Raton: CRC Press, 2011. 560 p.
- FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001. DOI: 10.1081/PLN-100106981.
- FIRMANO, R. F.; MELO, V. de F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; ALLEONI, L. R. F. Soybean and soil potassium pools responses to long-term potassium fertilization and deprivation under no-till nutrient management & soil & plant analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, p. 1819-1829, 2019.
- FIRMANO, R. F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; ALLEONI, L. R. F. Potassium rates on the cationic balance of an Oxisol and soybean nutritional status after 8 years of K deprivation. **Experimental Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 293-311, 2020.
- GERENDÁS, J.; FÜHRS, H. The significance of magnesium for crop quality. **Plant and Soil**, v. 368, p. 101-128, 2013. DOI: 10.1007/s11104-012-1555-2.
- GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil**, v. 368, p. 5-21, 2013. DOI:10.1007/s11104-012-1567-y.
- GONÇALVES, S. L.; OLIVEIRA, M. C. N. de; FARIAS, J. R. B.; SIBALDELI, R. N. R. Mathematical equations representing the impacts of climatic factors on soybean productivity in the 2018/2019 crop season in Parana State, Brazil. **Agrometeoros**, v. 28, e026748, 2020.
- HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7th. ed. Upper Saddle River: Pearson; New Jersey: Prentice Hall, 2005. 515 p.

HEENAN, D. P.; CAMPBELL, L. C. Influence of potassium and manganese on growth and uptake of magnesium by soybeans (*Glycine max* (L.) Merr. cv. Bragg). **Plant and Soil**, v. 61, p. 447-456, 1981.

HUBER, D. M.; JONES, J. B. The role of magnesium in plant disease. **Plant and Soil**, v. 368, p. 73-85, 2013. DOI 10.1007/s11104-012-1476-0.

JOY, E. J. M.; YOUNG, S. D.; BLACK, C. R.; ANDER, E. L.; WATTS, M. J.; BROADLEY, M. R. Risk of dietary magnesium deficiency is low in most African countries based on food supply data. **Plant and Soil**, v. 368, p. 129-137, 2013. DOI: 10.1007/s11104-012-1388-z.

KARLEY, A. J.; WHITE, P. J. Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, p. 291-298, 2009. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.04.013.

KINRAIDE, T. B. Three mechanisms for the calcium alleviation of mineral toxicities. **Plant Physiology**, v. 118, p. 513-520, 1998.

KOPITKE, P. M.; MENZIES, N. W. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 2, p. 259-265, 2007.

KURVITS, A.; KIRKBY, E. A. The uptake of nutrients by sunflower plants (*Helianthus annuus*) growing in a continuous flowing culture system, supplied with nitrate or ammonium as nitrogen source. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 143, p. 140-149, 1980.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: nutrição de plantas e fertilidade do solo**. São Paulo: Ceres, 1976. 528 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MANDARINO, J. M. G.; OLIVEIRA, M. A. de; BENASSI, V. de T.; CORRÊA, D. S.; LEITE, R. S. Características físico-químicas, tecnológicas e sensoriais dos grãos. In: LORINI, I. (Ed.). **Qualidade de sementes e grãos comerciais de soja no Brasil - safra 2014/15**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. p. 127-153. (Embrapa Soja. Documentos, 378).

MANDARINO, J. M. G.; OLIVEIRA, M. A. de; BENASSI, V. T.; LEITE, R. S. Características físico-químicas e tecnológicas dos grãos: teor de proteína, teor de óleo, acidez do óleo e teor de clorofila. In: LORINI, I. (Ed.). **Qualidade de sementes e grãos comerciais de soja no Brasil - safra 2015/16**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. p. 157-181. (Embrapa Soja. Documentos, 393).

MANDARINO, J. M. G.; OLIVEIRA, M. A. de; LEITE, R. S. Características físico-químicas e tecnológicas dos grãos: teor de proteína, teor de óleo, acidez do óleo e teor de clorofila. In: LORINI, I. (Ed.). **Qualidade de sementes e grãos comerciais de soja no Brasil - safra 2016/2017**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. p. 156-177. (Embrapa Soja. Documentos, 403).

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd. ed. London: Elsevier, 2012. 651 p.

MELO, V. F.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 269-284, 2000.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute, 1978. 593 p.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de.; CASTRO, C. de.; PEREIRA, L. R.; DOMINGOS, C. da S. **Estádios fenológicos e marcha de absorção de nutrientes da soja**. Paçandu: Fortgreen; Londrina: Embrapa Soja, 2016. 1 cartaz, color., 70 cm x 100 cm. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1047123/estadios-fenologicos-e-marcha-de-absorcao-de-nutrientes-da-soja>. Acesso em: 20 ago. 2020.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO C, de; OLIVEIRA, F. A. de; JORDÃO, L. T. Adubação potássica da soja: cuidados no balanço de nutrientes. **Informações Agronômicas**, n. 143, p. 1-10, 2013.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (Ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. cap. 7, p. 133-184. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

OLIVEIRA, F. A. de; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 2, p. 329-335, 2001.

PIPOLO, A. E.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; MANDARINO, J. M. G. **Teores de óleo e proteína em soja**: fatores envolvidos e qualidade para a indústria. Londrina: Embrapa Soja, 2015. 15 p. (Embrapa Soja. Comunicado Técnico, 86).

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, [2000]. 111 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

ROSANOFF, A.; WEAVER, C. M.; RUDE, R. K. Suboptimal magnesium status in the United States: are the health consequences underestimated? **Nutrition Reviews**, v. 70, n. 3, p. 153-164, 2012.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; MAIA, L. C.; NAKAGAWA, J. Respostas de soja ao magnésio do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p. 47-54, 1992.

RUSSELL, E. J. (Ed.) **Soil conditions and plant growth**. 7th. ed. London: Longmans, Green, 1942. 655 p.

RUSSELL, E. W.; RUSSELL, E. J. **Soil conditions and plant growth**. 10th. ed. London: Longman, 1973. 849 p.

SANTOS, J. E. P. Distúrbios metabólicos. In: BERCHIELLI, T. T.; PIRES, A. V.; OLIVEIRA, S. G. (Ed.). **Nutrição de ruminantes**. 2 ed. Jaboticabal: Funep, 2011. p. 439-516.

SCHULTE, E. E.; KELLING, K. A. **Soil calcium to magnesium ratios - should you be concerned?** Madison: University of Wisconsin, [2004]. (University of Wisconsin. Cooperative Extension Publications, A2986). Disponível em: <http://corn.agronomy.wisc.edu/Management/pdfs/a2986.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2020.

SENBAYRAM, M.; GRANSEE, A.; WAHLE, V.; THIEL, H. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant-soil continuum. **Crop and Pasture Science**, v. 66, n. 12, p. 1219-1229, 2015.

SILVA, I. R.; FERRUFINO, A.; SANZONOWICZ, C.; SMYTH, T. J.; ISRAEL, D. W.; CARTER JÚNIOR, T. E. Interactions between magnesium, calcium, and aluminum on soybean root elongation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 747-754, 2005.

SLATER, A. C. **Mineral e minérios**. São Paulo: Ed. LEP, 1952. 159 p.

SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVEIRA, S. A. de. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBSCS, 2007. p. 205-274.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 2nd ed. Massachusetts: Sinauer Associates, 1998. 792 p.

TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; GALLO, P. B. Concentração e produtividade de óleo e proteína de soja em função da adubação potássica e da calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 4, p. 463-469, 1995.

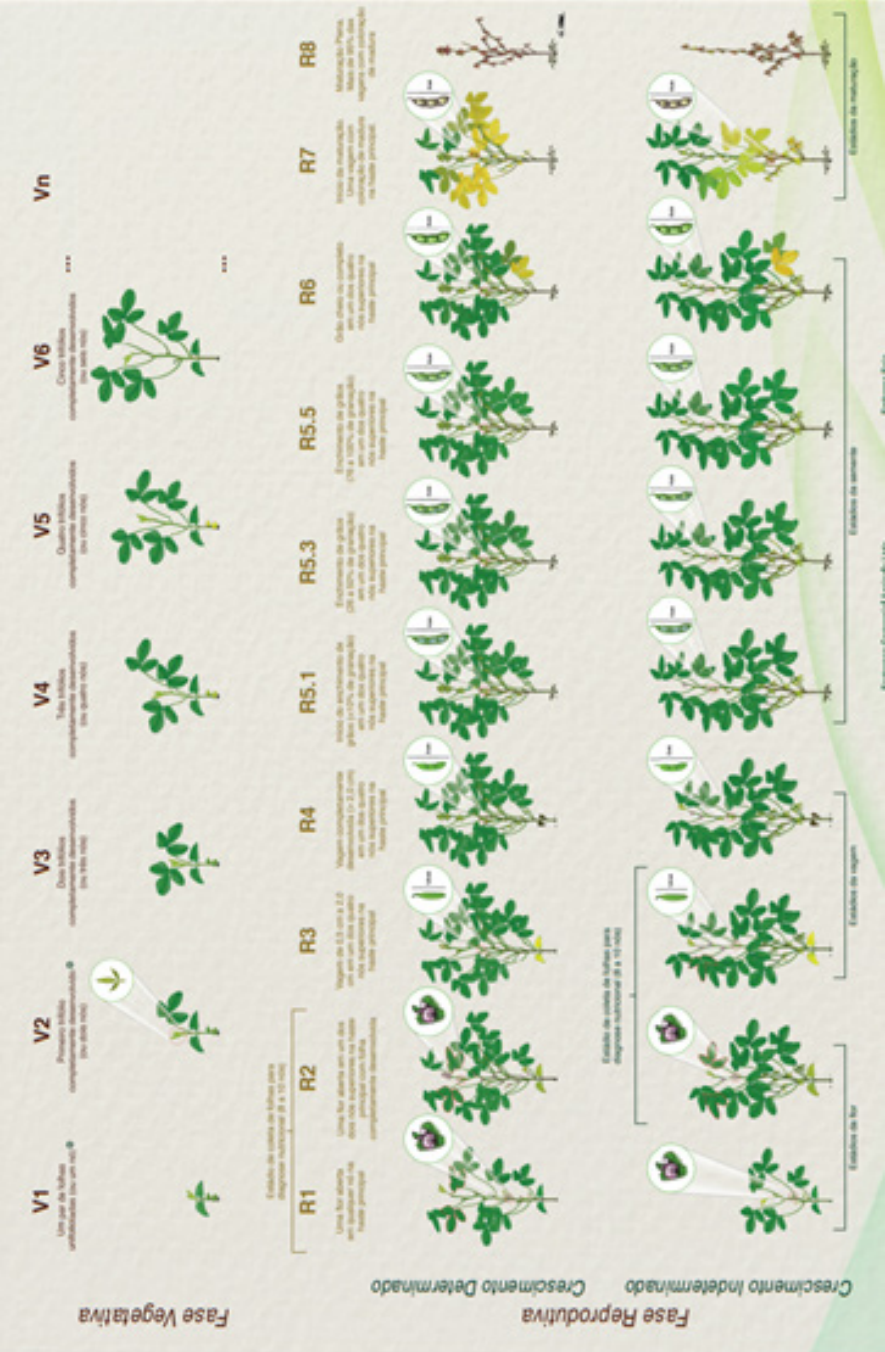
TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. 5th ed. New York: Macmillan, 1993. 634 p.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4th ed. New York: Macmillan, 1985. 754 p.

USHERWOOD, N. R. Interações do potássio com outros íons. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1982, Londrina. **Anais...** Londrina: IAPAR; Piracicaba: Instituto de Potassa & Fosfato, 1982. p. 227-247.

WHITE, J. P.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets - iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist**, v. 182, p. 49-84, 2009. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x.

Anexo 1. Estádios de desenvolvimento da soja com tipo de crescimento determinado e indeterminado.



Fonte: Oliveira Junior et al. (2016)



Patrocínio



Magnésio de alto desempenho
www.ibarnordeste.com.br



www.icl-group.com